**В.С. Карпиловский, Э.З. Криксунов, А.А. Маляренко,**
**А.В. Перельмутер, М.А. Перельмутер, С.Ю. Фиалко**

# SCAD Office
# Версия 23
# Вычислительный комплекс SCAD++

**издание пятое исправленное и дополненное**

**электронная версия**

**Киев • 2024**

SCAD Office.V.23.System SCAD++ / V.S.Karpilovskyy, E.Z.Kryksunov, A.A Maliarenko, A.V.Perelmuter, M.A.Perelmuter, S.Y. Fialko. — Publishing House SCAD SOFT, 2024. — 992 p.

The book is intended for users of the software application pack. It can be useful both for beginners who do not have an experience of using structural analysis software and for those who know software of this type well enough and have an experience of working with this particular application. The book deals successively with all aspects of preparing data in the graphics interactive mode, performing an analysis, reviewing and documenting results, as well as with peculiarities of using analysis and design post-processors. A minimum amount of theoretical basics is given to help users understand better analysis methods implemented in the software.

The book may be of interest for students of appropriate specialities and developers of similar software products.

SCAD Office.Версия 23.Вычислительный комплекс SCAD++ / В.С. Карпиловский, Э.З. Криксунов, А.А. Маляренко, А.В. Перельмутер, М.А. Перельмутер, С.Ю. Фиалко. — Издательство «СКАД СОФТ» , 2024.— 992 стр.

Книга предназначена для пользователей вычислительного комплекса и может быть полезной как для начинающих, не имеющих опыта применения программных средств прочностного анализа конструкций, так и для тех, кто хорошо знаком с такими программами и имеет опыт работы с комплексом. Последовательно рассматриваются все аспекты подготовки данных в режиме графического диалога, расчета, анализа и документирования результатов, а также особенности использования расчетных и проектирующих постпроцессоров. Приведены минимальные теоретические сведения, помогающие лучше понять реализованные методы расчета.

Книга может представлять интерес для студентов соответствующих специальностей и разработчиков аналогичных программ.

***Все права защищены. Никакая часть настоящей книги не может быть воспроизведена или передана в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами, будь то электронные или механические, включая фотокопирование и запись на магнитный носитель, а также размещение в сети «Интернет», если на то нет письменного разрешения владельца.***

© Коллектив авторов, 2024 г.

# Предисловие

Предыдущее издание этой книги в основном было посвящено описанию программы **SCAD** версии 11. В 2014 году компания SCAD Soft выпустила новую версию программы **SCAD++** (версия 21), что потребовало заметного обновления текста.

Опыт работы с читателями предыдущих изданий книги, которые являются также пользователями вычислительного комплекса **SCAD**, показал, что требуется не только описать возможности комплекса, но и заглянуть более глубоко во «внутренний мир» **SCAD**. Мы постарались учесть пожелания пользователей **SCAD Office**® (хоть и понимаем, что далеко не все).

Авторы стремились пополнить представления о вычислительном комплексе и другими публикациями, некоторые из которых ориентированы на более подготовленного читателя и связаны с методологическими проблемами как, например, вышедшая уже четвертым изданием книга о расчетных моделях сооружений[1], а другие посвящены более конкретным вопросам подобно брошюре о расчете мачт на оттяжках[2].

Книга ориентирована на читателя, являющегося пользователем вычислительного комплекса **SCAD++** или, по крайней мере, имеющего возможность сопровождать ее чтение работой с демо-версией комплекса. Мы настоятельно рекомендуем именно такой способ «чтения». При этом после ознакомления с разделом 4 другие части книги можно изучать в произвольном порядке. Особенно часто эту книгу используют как справочное пособие, пытаясь найти ответы на разнообразные вопросы, возникающие при работе с программой. В этом случае читателю может помочь достаточно подробный предметный указатель книги.

В разработке комплекса принимали участие И. Белокопытова, И. Гавриленко, С. Гиренко, М. Гуревич, Е. Зеливянский, В. Карпиловский, Э. Криксунов, С. Фиалко, И. Лайкина, П. Лицман, А. Марченко, М. Микитаренко, Л. Мошкин, А. Перельмутер, М. Перельмутер, Д. Рудь, А. Семенцов, Л. Скорук, В. Юрченко, а также Т. Верюжская и К. Попок.

Нельзя не отдать должное тем, кто внес свой вклад в развитие комплекса **SCAD**, щедро поделившись с разработчиками как своими научными идеями, так и многолетним инженерным опытом. Мы благодарны за постоянное внимание к нашим работам В. Белову (ФГУП «Атомэнергопроект», г. Москва), А. Варанице (НПФ «Реконструкция», г. Винница), Н. Ватину (Санкт Петербургский государственный политехнический университет), В. Гордееву (УкрНИИПСК, г. Киев), О. Кабанцеву (МонолитСтройПроект г. Москва), Н. Камынину (УкрНИИПСК, г. Киев), Л. Кацнельсону (ЦНИИСК), К. Козину (ГСПИ, г. Москва), В. Куликову (Мосинжпроект), В. Пискунову (Украинский транспортный университет), Т. Прохоровой (Промстройпроект, г. Москва), О. Рожкову (ФГУП Атомэнергопроект, г. Нижний Новгород), В. Сливкеру (Гипростроймост, г. Санкт-Петербург), А.Г. Тяпину (АЭП, г. Москва), В. Федоровскому (НИИОСП, г. Москва), В. Попову (In Re,

[1] Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа / 4-е изд., исправленное и дополненное — М.: СКАД Софт, АСВ, ДМК Пресс, 2011.— 709 с.

[2] Перельмутер А.В. SCAD Office. Расчет мачт на оттяжках.— К.: Издание ООО SCAD Soft, 2004.— 47 с.

г. Вильнюс), С.А. Семенову (ООО Центропроект, г. Уфа), Г. Едигарову и Р. Ожогину (SCAD Soft, г. Москва), и многим другим, кто поддерживал и поддерживает в нас уверенность в нужности и верности наших разработок. Мы храним добрую память о безвременно ушедших от нас Евгении Борисовиче Зеливянском, Александре Александровиче Дыховичном и Льве Сергеевиче Мошкине, внесшим большой вклад в нашу работу.

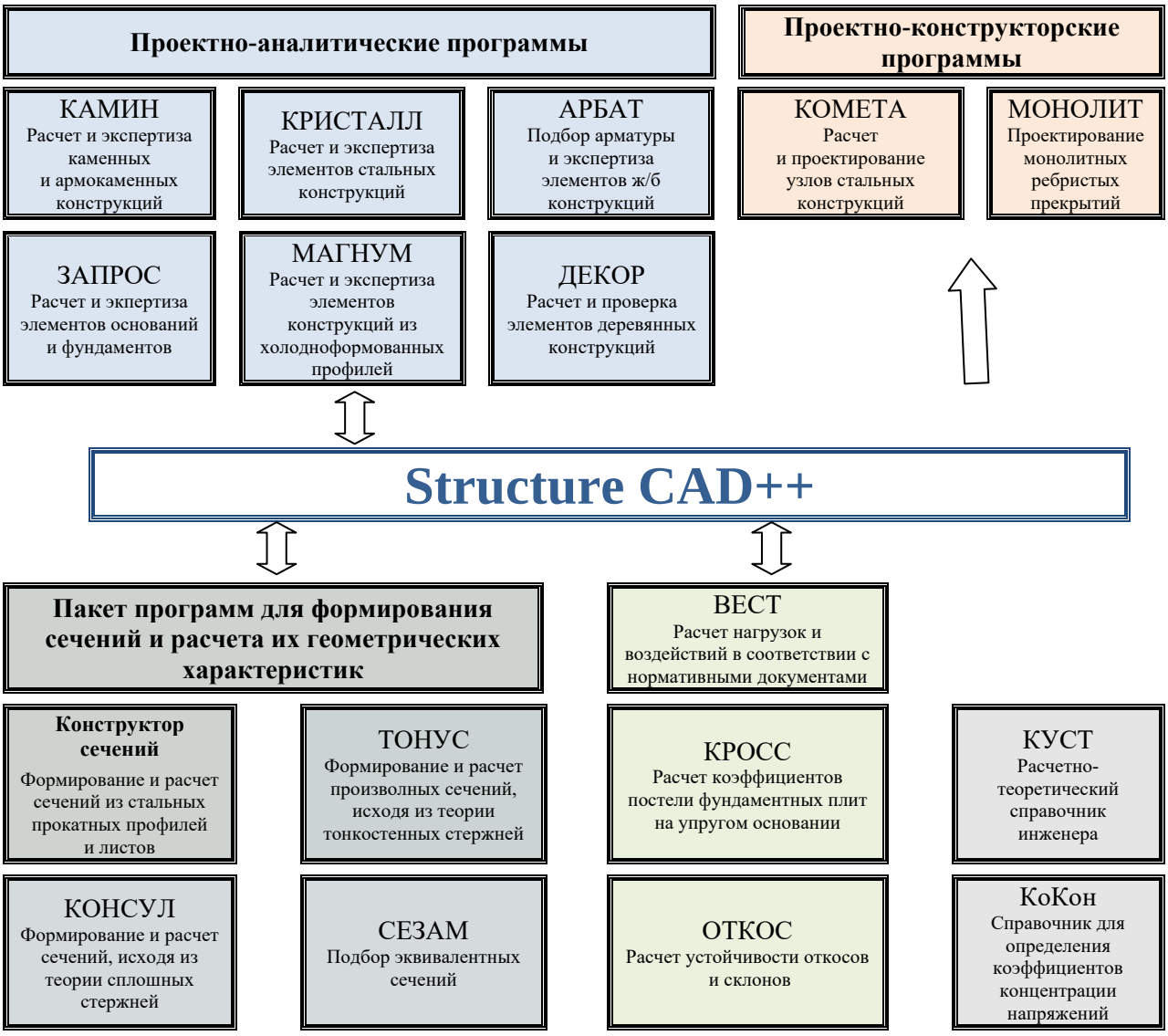
Наши коллеги Н. Мосина и Л. Скорук, которые ведут занятия с будущими пользователями **SCAD**, во многом помогли нам улучшить текст книги, указав на трудные для первоначального усвоения вопросы, требующие особо тщательного изложения. Этой же цели способствовал опыт многочисленных консультаций, которые давались нашими коллегами в ответ на письменные и устные запросы пользователей **SCAD**.

Создание интерфейса вычислительного комплекса **SCAD** с различными проектирующими и графическими системами было бы невозможно без плодотворного сотрудничества с другими коллективами разработчиков. Среди них особо хотелось бы отметить такие компании как Allbau Software GmbH, Nemetschek AG, Tekla, Autodesk.

И, наконец, мы хотим поблагодарить наших партнеров, благодаря усилиям которых комплекс **SCAD** достиг сегодняшней популярности у пользователей. Несомненными лидерами здесь являются компании Consistent Software, АСКОН, АРКАДА, АСПО, ИНФАРС, Петростройсистема, IN RE, РПК, Softline и др.

# 1. Система SCAD Office

Система **SCAD Office** представляет собой набор программ, предназначенных для выполнения прочностных расчетов и проектирования различного вида и назначения строительных конструкций.




В её состав входят программы четырех видов:

- вычислительный комплекс **Structure CAD** (ВК **SCAD**), который является универсальной расчетной системой конечно-элементного анализа конструкций и ориентирован на решение задач проектирования зданий и сооружений достаточно сложной структуры;
- вспомогательные программы, предназначенные для «обслуживания» ВК **SCAD** и обеспечивающие: формирование и расчет геометрических характеристик различного вида сечений стержневых элементов (**Конструктор сечений**, **Консул**, **ТОНУС**, **СЕЗАМ**), определение нагрузок и воздействий на проектируемое сооружение (**ВеСТ**), вычисление коэффициентов постели, необходимых при расчете конструкций на упругом основании (**Кросс**); импорт данных из архитектурных систем и формирование укрупненных моделей (интегрированный в программу **SCAD** препроцессор **ФОРУМ**);
- проектно-аналитические программы **Кристалл**, **Камин,** **Декор**, **АРБАТ** и **ЗАПРОС**, которые предназначены для решения частных задач проверки и расчета элементов стальных,

каменных, деревянных и железобетонных конструкций и элементов оснований и фундаментов в соответствии с требованиями нормативных документов (СНиП);

- проектно-конструкторские программы **КОМЕТА** и **Монолит**, предназначенные для разработки конструкторской документации на стадии детальной проработки проектного решения.

ВК **SCAD** включает развитые средства подготовки данных, расчета и анализа результатов и не имеет практических ограничений на размеры и форму проектируемых сооружений. Вместе с тем для инженера-проектировщика не менее (а во многих случаях и более) важными являются «простые» задачи, решение которых занимает у него заметную часть времени. Проверка сечений элементарных балок, сбор нагрузок на элементы конструкции, определение геометрических характеристик составных сечений — это далеко не полный перечень такого рода рутинных проектных задач.

Указанные обстоятельства стимулировали разработку серии «малых» программ-сателлитов ВК **SCAD**, ориентированных на решение массовых задач проектирования. Вместе с вычислительным комплексом они составляют систему **SCAD Office**. При разработке программ-сателлитов предусматривается общность в представлении данных, способах управления, используемых форм проверки нормативных требований и показа результатов таких проверок, документирования работы и т. п. При этом любая из программ, входящая в систему **SCAD Office**, может использоваться в автономном режиме.

Выбор проектных процедур, представленных в программах системы, определялся следующими соображениями:

- массовость применения — нет смысла разрабатывать промышленные программные продукты разового использования;
- четкость поставленной задачи — ориентация на массового пользователя не позволяет предлагать задачи, нечетко сформулированные или не имеющие четкого однозначного решения;
- относительная трудность традиционных методов — нет смысла программировать тривиальные вычисления, задача должна быть такой, чтобы использование программы снижало бы затраты труда и/или уменьшало бы вероятность появления вычислительных ошибок;
- наличие справочно-информационных материалов.

Кроме того, имея в виду, что пользователем программ может быть не только опытный проектировщик, но и начинающий инженер, разработчики старались создать такие программные продукты, которые могли бы предохранить пользователя от пропуска любой из многочисленных проверок, представленных в нормах проектирования. В частности, набор рассматриваемых конструктивных решений продиктован, в числе прочего, и тем, что анализируются только такие конструкции, для которых нормы проектирования полностью обозначили все требования.

## 1.1. Вычислительный комплекс Structure CAD

Вычислительный комплекс **Structure CAD** (**SCAD**) реализован как интегрированная система прочностного анализа и проектирования конструкций на основе метода конечных элементов и позволяет определить напряженно-деформированное состояние конструкций от статических и динамических воздействий, а также выполнить ряд функций проектирования элементов конструкций.

### Проект

В основу комплекса положена система функциональных модулей, связанных между собой единой информационной средой. Эта среда называется **проектом** и содержит полную информацию о расчетной схеме, представленную во внутренних форматах комплекса. В процессе формирования расчетной схемы проект наполняется информацией и сохраняется на диске в файле с расширением **.spr**. Имя проекта и файла задаются при создании новой схемы.

Исходные данные для выполнения расчета могут быть подготовлены как с помощью интерактивных графических средств, так и путем их описания в текстовом формате. Следует отметить, что в существующей версии комплекса вся входная информация, необходимая для выполнения подавляющего большинства практических расчетов, может быть подготовлена в

«графике», и к тестовому описанию приходится прибегать только при выполнении уникальных расчетов. Текстовый файл является удобным форматом для хранения данных. Он хорошо поддается сжатию с помощью известных программ архивации и, при необходимости, может быть преобразован в форматы стандартного проекта комплекса **SCAD**. Второй привлекательной чертой текстового формата является его совместимость с предыдущими версиями комплекса, что позволяет использовать комплекс для проверочных расчетов ранее спроектированных объектов.

## Функциональные модули

Функциональные модули **SCAD** делятся на четыре группы. В первую группу входят модули, обеспечивающие ввод исходных данных в интерактивном графическом режиме (графический препроцессор), выполнение статического и динамического расчетов (процессор), графические проверка и анализ результатов расчета (графический постпроцессор). Модули второй группы служат для вычисления расчетных сочетаний усилий, комбинаций загружений, главных и эквивалентных напряжений, реакций, нагрузок от фрагмента схемы, а также анализа устойчивости, построения спектров ответа и амплитудно-частотных характеристик — и условно называются расчетными постпроцессорами. Документирование результатов расчета выполняется модулями третьей группы. В четвертую группу включаются проектирующие модули (проектирующие постпроцессоры), которые служат для проверки и подбора арматуры в элементах железобетонных конструкций; проверки и подбора сечений элементов стальных конструкций.

Модульная структура дает возможность сформировать для каждого пользователя такую конфигурацию **SCAD**, которая максимально отвечает его потребностям по классу решаемых задач, средствам создания расчетных схем, анализу и документированию результатов расчета.

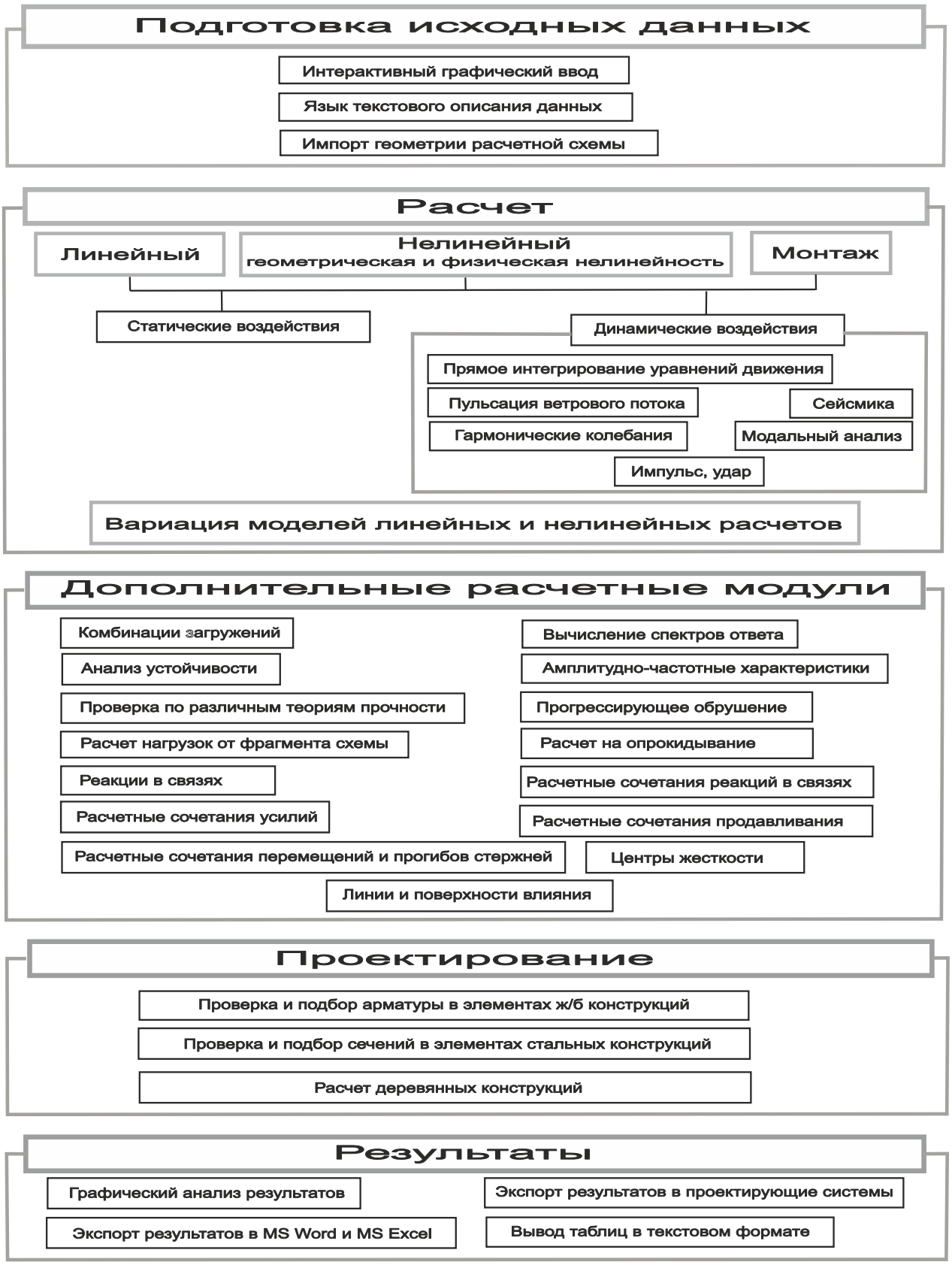
Все функциональные модули реализованы в единой графической среде. Интерфейс, сценарии взаимодействия пользователя с системой, функции контроля исходных данных и анализа результатов полностью унифицированы, что обеспечивает минимальное время освоения комплекса и логичную последовательность выполнения операций.

Структура комплекса и связь между его компонентами показана на рисунке 1.1-1.

## Процессор и библиотека конечных элементов

Высокопроизводительный процессор позволяет решать задачи статики и динамики с большим количеством степеней свободы. Расчет сопровождается подробным протоколом, который может быть проанализирован как по ходу выполнения расчета, так и после его завершения. Система контроля исходных данных выполняет проверку расчетной схемы и фиксирует все обнаруженные ошибки и предупреждения.

Библиотека конечных элементов содержит различные виды стержневых элементов, включая шарнирно-стержневые, рамные, балочного ростверка на упругом основании, позволяет учитывать сдвиг в сечении стержня. Пластинчатые элементы, которые представлены трех- и четырехузловыми элементами плит, оболочек и балок-стенок, могут содержать дополнительные узлы на ребрах, и обеспечивают решение задач для материалов с различными свойствами (с учетом ортотропии, изотропии и анизотропии). Кроме того, библиотека включает различные виды объемных элементов, набор трех- и четырехузловых многослойных и осесимметричных конечных элементов, а также специальные элементы для моделирования связей конечной жесткости, упругих связей и другие.




1.1-1. *Структура* ВК **SCAD**

## Графические средства формирования расчетной схемы

В комплексе **SCAD** реализованы два вида графических модулей создания расчетных схем. К ним относятся традиционный для конечно-элементных систем графический препроцессор, в котором основным «строительным материалом» для формирования расчетной схемы являются конечные элементы, и препроцессор **ФОРУМ** для формирования укрупненных моделей.

В традиционном препроцессоре предусмотрена широкая гамма средств для создания моделей, которые включают функции формирования схем по параметрическим прототипам конструкций, генерации сеток элементов на плоскости и в пространстве, копирования фрагментов схем, сборки из подсхем и групп, различные функции геометрических преобразований. В режиме графического диалога задаются все основные параметры схем, включая жесткостные характеристики элементов, условия опирания и примыкания, статические и динамические нагрузки и др. Графический интерфейс максимально приближен именно к технологии создания и модификации расчетных схем и учитывает особенности обработки информации этого вида.

В препроцессор включены параметрические прототипы многоэтажных и одноэтажных рам, ферм с различным очертанием поясов и решеток, балочные ростверки, а также поверхности вращения (цилиндр, конус, сфера и тор). В процессе их формирования могут быть автоматически назначены условия опирания, типы и жесткости конечных элементов.

Специальные средства предусмотрены для создания расчетных моделей, поверхность которых описывается аналитически. Эти средства позволяют автоматически генерировать сетку элементов на поверхности, заданной как функция двух переменных. Для формирования произвольных сеток на плоскости используется автоматическая триангуляция, с помощью которой сетка может быть нанесена на любую область расчетной схемы.

Набор функций модификации геометрии расчетной схемы включает различные виды геометрических преобразований, позволяющие изменить масштаб всей схемы или выделенного фрагмента, осуществить поворот вокруг заданной оси, получить зеркальное отражение, перенести часть схемы на указанное расстояние и др. Вместе с широкой гаммой средств работы с выбранными узлами и элементами, эти функции дают возможность создать практически любую по сложности расчетную модель.

Для того чтобы обеспечить инженеру работу с расчетной схемой в привычной среде, используются разбивочные (координационные) оси. На этих осях могут выполняться операции по созданию схемы и ее фрагментации. Они могут быть показаны на всей схеме или на любом ее фрагменте.

## Укрупненные расчетные модели и связь с другими системами

Формирование расчетной схемы или ее части может быть выполнено и на основе информации, полученной из:

- других расчетных программ;
- сеточных генераторов;
- графических редакторов;
- конструкторских программ.

Это может быть импорт из таких популярных систем, как AllPLAN, ArchiCAD, Revit, Tekla, Advance Steel, и из файлов в форматах DXF и DWG системы AutoCAD, и ряда других форматов (например, IFC, SDNF, ...).

Очевидно, что архитектурная модель не может быть полностью автоматически преобразована в расчетную схему. Это обусловлено наличием в ней «архитектурных излишеств», которые не являются элементами расчетной модели и не влияют на результаты расчета, не всегда аккуратным сопряжением элементов модели, отсутствием данных об условиях примыкания и опирания элементов, нагрузках, материалах и т. п. Трудоемкость доведения полученной в результате импорта модели до уровня расчетной схемы чаще всего зависит от согласованности действий архитектора и конструктора на стадии создания архитектурной модели.

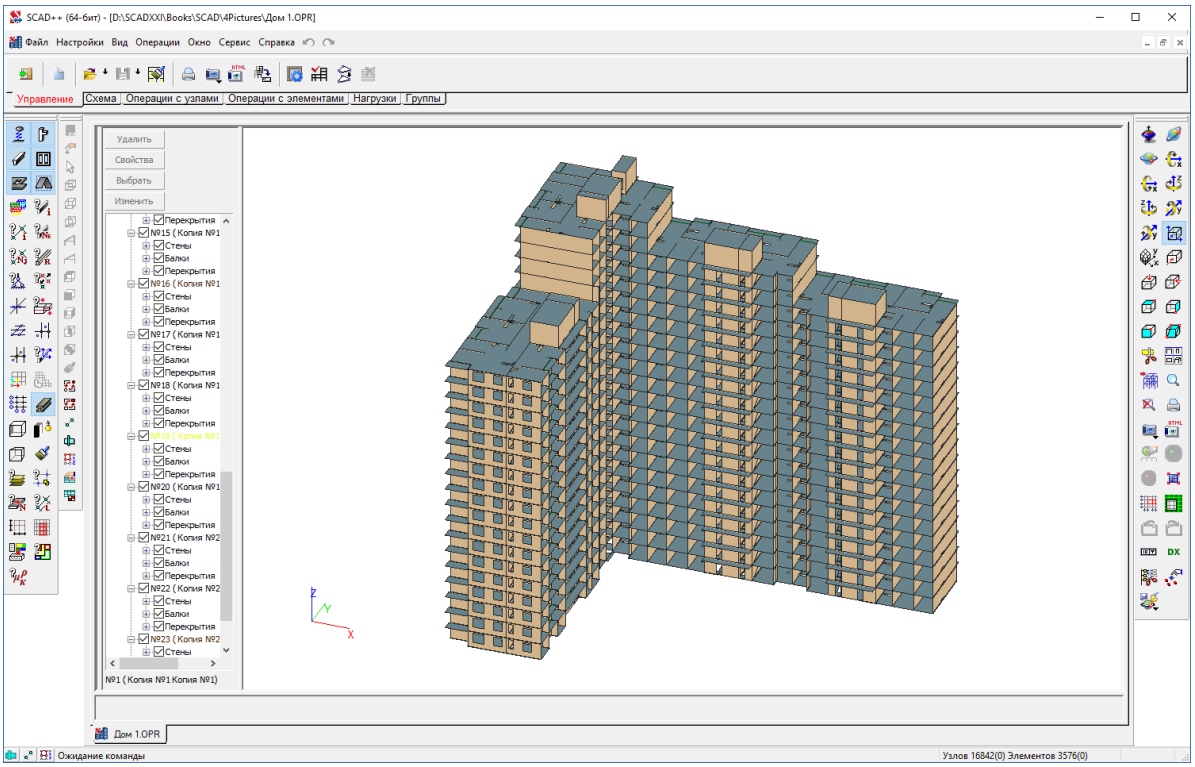


Рис. 1.1-2. *Расчетная модель, сформированная в препроцессоре* **ФОРУМ**

Для упрощения этого процесса в состав вычислительного комплекса **SCAD** включен специальный препроцессор **ФОРУМ**, в котором для формирования расчетной модели используются объекты, максимально приближенные по назначению и наименованиям к объектам архитектурной модели. К ним относятся колонны, балки, перекрытия, стены и крыши. Представление геометрии расчетной схемы в препроцессоре **ФОРУМ** (рис. 1.1-2) обеспечивает возможность:

- создания структурированной расчетной модели из укрупненных элементов;
- сохранения структуры объекта, заданной в архитектурной модели;
- передачи структуры объекта в препроцессор комплекса **SCAD** с использованием для этого автоматического преобразования (триангуляции) укрупненной модели в конечно-элементную модель (расчетную схему).

### Группы

Особую роль при формировании расчетной схемы и анализе результатов играют группы узлов и элементов. Группы — это именованные наборы узлов или элементов, которые могут неоднократно использоваться для выполнения различных операций. Процесс объединения объектов в группы полностью регулируется пользователем. Это могут быть характерные участки конструкции, например, междуэтажные перекрытия, элементы пространственного каркаса, стены или другие наборы объектов. Главное, что группы доступны на всех этапах работы со схемой — при формировании модели, анализе и документировании результатов расчета. Графическая среда построена таким образом, что всегда можно локализовать информацию в рамках одной или нескольких групп узлов и элементов.

### Фильтры

В последнее время наметилась тенденция, связанная с усложнением расчетных моделей и, как следствие, увеличением количества узлов и элементов в расчетных схемах. Существенное увеличение размерности задач потребовало пересмотра главных критериев эффективности процесса и методов создания расчетных схем и анализа результатов расчета. В условиях столь больших и насыщенных схем естественным стал перенос акцентов от функций формирования (хотя их роль нисколько не

снизилась) к функциям контроля созданной схемы. Главную роль здесь играет реализованная в **SCAD** развитая система фильтров, с помощью которых устанавливаются правила отображения информации на схеме, а также функции визуализации и фрагментации схемы. Фильтры позволяют отобрать для отображения информацию о расчетной схеме по десяткам критериев. При этом широко используются цветовые средства отображения информации, которые совместно с фрагментацией позволяют «добраться» до любых параметров независимо от размера модели.

### Графический постпроцессор

Для больших расчетных моделей существует и проблема анализа результатов. Объемы возможной результирующей информации, как правило, намного превышают возможности человека по ее осмыслению и анализу. Поэтому здесь наряду с решением чисто технических задач по улучшению временных факторов (реакция системы на запрос пользователя или время удаления линий невидимого контура при построении изолиний и изополей) проявляются проблемы, связанные с поиском среди тысяч элементов и узлов объектов с критическими для данной задачи значениями анализируемого фактора. Реализованные в комплексе операции фрагментации, система фильтров, настраиваемые цветовые шкалы обеспечивают оперативный доступ ко всем видам результирующей информации. Важно, что при этом имеется возможность выделить ту часть расчетной схемы, на которой реализовались результаты (усилия, перемещения) из заданного диапазона величин, «отодвинув в тень» остальную часть схемы.

Результаты расчета могут быть представлены в виде схем перемещений и прогибов, эпюр, изолиний и изополей. Одновременно на схему могут выводиться и числовые значения факторов. Для статических и динамических загружений предусмотрена возможность анимации процесса деформирования схемы и записи этого процесса в формате видеоклипа (AVI). Любая графическая информация может выводиться на печать или сохраняться в формате Windows метафайла (WMF, EMF). Наряду с результатами расчета, средства графического анализа позволяют отобразить на схеме в виде эпюр (для стержневых элементов) или изолиний и изополей (для пластин) результаты работы модуля подбора арматуры в элементах железобетонных конструкций, включая такую информацию, как площадь арматуры в заданном направлении, ширина раскрытия трещин, процент армирования и др. Это приближает форму представления результатов к привычному для инженера виду и создает для него дополнительный комфорт.

### Документирование результатов

Модули документирования результатов расчета позволяют сформировать таблицы с исходными данными и результатами в текстовом или графическом форматах, а также экспортировать их в MS Word или MS Excel. Формирование таблиц выполняется с учетом групп узлов и элементов, таблицы можно дополнить комментариями и включить в них графическую информацию. Таким образом, отчетный документ может редактироваться средствами MS Word и приобретать удобную для конкретного пользователя форму (например, в соответствии с принятым в его фирме стандартом), а экспорт в MS Excel обеспечивает возможность последующей нестандартной обработки результатов применительно к конкретным обстоятельствам использования.

## 1.2. Проектно-аналитические программы

Проектно-аналитические программы **Кристалл**, **Камин**, **Декор**, **ЗАПРОС** и **АРБАТ** предназначены для выполнения проверок и расчета элементов и соединений стальных, каменных, деревянных и железобетонных конструкций на соответствие требованиям нормативных документов. В основу их разработки положен принцип ориентации на строгое и, по возможности, полное выполнение всех требований, представленных в нормах по проектированию конструкций. Связь с ВК **SCAD** осуществляется путем передачи значений расчетных сочетаний усилий конкретного элемента.

### Программа Кристалл

Программа предназначена для выполнения проверок элементов и соединений стальных конструкций на соответствие требованиям СНиП II-23-81* «Стальные конструкции. Нормы

проектирования», КМК 2.03.05-97, СП 53-102-2004 «Общие правила проектирования стальных конструкций», СП 16.13330 Актуализированная редакция СНиП II-23-81* «Стальные конструкции», ДБН В.2.6-163:2010 и ДБН В.2.6-198:2014 "Стальные конструкции" и Eurocode-3. Кроме того, при создании программы использовались связанные со СНиП II-23-81* государственные стандарты, «Пособие по проектированию стальных конструкций (к СНиП II-23-81*) / ЦНИИСК им. Кучеренко» и некоторые методологические положения норм СНиП 53-1-96.

В программе реализованы следующие режимы работы:

- **Стали** — реализация рекомендаций СНиП, СП и ДБН по выбору марок стали;
- **Сортамент металлопроката** — просмотр сортаментов металлопроката с выдачей всех характеристик профилей;
- **Болты** — просмотр сортамента болтов;
- **Предельные гибкости** — назначение предельных гибкостей по рекомендациям СНиП;
- **Коэффициенты условий работы** — выбор значений коэффициентов условий работы элементов ($\gamma_c$) по рекомендациям норм;
- **Материалы для сварки** — реализованы требования СНиП, СП и ДБН в части выбора материалов для сварных соединений и в части выбора расчетных сопротивлений сварных соединений;
- **Предельные прогибы —** приведены таблицы СНиП 2.01.07-85* "Нагрузки и воздействия" (или ДСТУ Б В.1.2-3:2006 при работе по ДБН В.2.6-163:2010 или ДБН В.2.6-198:2014) с ограничениями на прогибы элементов конструкций;
- **Сортамент листовой стали —** приведена информация о сортаментах листовой стали;
- **Высокопрочные болты —** здесь приведены размеры и характеристики высокопрочных болтов, гаек и шайб;
- **Огибающие** — определение невыгодных сочетаний многих нагрузок, которые действуют на изгибаемые элементы, построение огибающих эпюр моментов и поперечных сил;
- **Линии влияния** — построение линий влияния изгибающих моментов и поперечных сил в неразрезных балках;
- **Геометрические характеристики** — вычисление геометрических характеристик поперечного сечения;
- **Расчетные длины** — рекомендации СНиП и Еврокода-3 по определению коэффициентов расчетной длины;
- **Сопротивление сечений** — определение коэффициентов использования ограничений для любого из предусмотренных программой типов поперечных сечений;
- **Болтовые**, **Фрикционные** и **Сварные соединения** — для различных конструктивных решений указанных соединений определение коэффициентов использования ограничений и построение кривых взаимодействия;
- **Местная устойчивость** — проверка местной устойчивости стенок и поясных листов изгибаемых и сжатых элементов;
- **Фермы**, **Балки** и **Стойки** — проверка элементов на прочность, устойчивость и предельную гибкость; определение расчетных значений усилий и их сочетаний от задаваемых внешних нагрузок. Предусмотрен подбор сечений;
- **Опорные плиты** — рассмотрение пластин, составляющих базу колонны, при различных вариантах их окаймления ребрами;
- **Листовые конструкции —** проверка прочности и устойчивости листовых конструкций (цилиндрических оболочек, конических оболочек, цилиндрических панелей).

### Программа Камин

Программа предназначена для проверок несущей способности конструктивных элементов каменных и армокаменных конструкций в соответствии с требованиями СНиП II-22-81 «Каменные и армокаменные конструкции», СП 15.13330.2012 и документов, выпущенных в развитие и дополнение этих норм.

В состав проверяемых элементов включены центрально и внецентренно нагруженные столбы различного поперечного сечения в плане, рядовые, клинчатые и арочные перемычки, а также железобетонные балочные перемычки, наружные и внутренние стены здания с проемами и без проемов, стены подвалов.

Кроме проверки общей прочности и устойчивости элементов выполняется экспертиза местной прочности в местах опирания балок, прогонов и других элементов на стены и столбы.

Проверки выполняются как для неповрежденных конструктивных элементов, так и для элементов, имеющих трещины в каменной кладке и огневые повреждения вследствие воздействия температуры (например, в результате пожара). При проверках поврежденных конструкций использован документ «Рекомендации по усилению каменных конструкций зданий сооружений. ЦНИИСК им. В.А.Кучеренко Госстроя СССР».

Также проверяется несущая способность центрально и внецентренно нагруженных элементов, усиленных стальными обоймами, и стен, ослабленных дополнительно образованными проемами.

## Программа АРБАТ

Программа предназначена для подбора и проверки существующей арматуры в элементах железобетонных конструкций (неразрезные балки и колонны), а также для вычисления прогибов в железобетонных балках согласно требованиям СНиП 2.03.01-84* «Бетонные и железобетонные конструкции» или СНиП 52-01-2003, СП 63.13330. Расчет выполняется по предельным состояниям первой и второй группы для расчетных сочетаний усилий (РСУ), выбираемых автоматически в зависимости от заданных нагрузок в соответствии с требованиями СНиП 2.01.07-85* «Нагрузки и воздействия» или СП 20.13330.2011. Подбор и проверки выполняются для железобетонных конструкций из тяжелого, мелкозернистого и легкого бетонов с применением арматурной стали класса, предусмотренного нормами, а также арматурной проволоки.

Выполняется подбор арматуры в многопролетных балках постоянного сечения (прямоугольного, таврового или двутаврового) и в колоннах (прямоугольного, двутаврового или кольцевого сечений) по предельным состояниям первой и второй группы (прочность и трещиностойкость). Рассматривается плоская работа балки, а также плоская и пространственная работа колонны (в случае пространственной работы подбор выполняется только по прочности).

В режиме **Сопротивление сечений** (рис. 1.2-1) определяется несущая способность сечений в зависимости от положения, площади и класса арматуры, класса бетона, условий эксплуатации и допустимой ширины раскрытия трещин. Сечение стержня проверяется на прочность при совместном действии продольной силы и изгибающего момента, изгибающих моментов в двух силовых плоскостях, а также при совместном действии продольной и поперечной сил. Трещиностойкость при совместном действии продольной силы и изгибающего момента, а также при совместном действии продольной и поперечной сил. При использовании СП 63.13330 расчет производится на основании нелинейной деформационной модели.

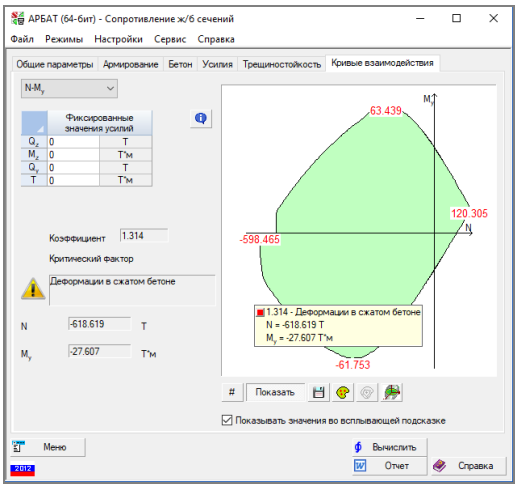



Рис. 1.2-1. *Проверка несущей способности колонны в программе* **АРБАТ**

Вычисляются прогибы в армированной многопролетной балке, обусловленные деформацией изгиба и возникающие под действием заданной нагрузки. Расчет прогибов выполняется для прямоугольного, таврового и двутаврового сечений согласно требованиям СНиП. Определение кривизны балки выполняется с учетом трещин в растянутой зоне.

Выполняется проверка заданного конструктивного решения прямоугольных монолитных плит, изгибаемых в одном и двух направлениях.

Реализуется проверка элементов железобетонных конструкций на местное действие нагрузок (местное сжатие, продавливание, отрыв) в соответствии с требованиями СНиП, а также расчет закладных деталей, коротких консолей и шпонок.

## Программа Декор

Программа предназначена для выполнения расчетов и проверок элементов деревянных конструкций и соединений на соответствие требованиям СНиП II-25-80, СП 64.13330.2011. Кроме того, в программе предусмотрена возможность получения справочных данных, наиболее часто используемых при проектировании деревянных конструкций. Реализованные в программе расчетные и информационные режимы объединены в две группы – **Информация** и **Расчет**.

Группа **Информация** включает следующие разделы:

- **Предельные прогибы и деформации** – приведены данные по предельным прогибам элементов деревянных конструкций различного назначения, а также величины предельных деформаций соединений;
- **Плотности** – данные по плотности древесины различной породы при различных условиях эксплуатации;
- **Сортамент древесины** – данные по пиломатериалам хвойных пород (ГОСТ 24454-80);
- **Расчетные сопротивления** – определяются расчетные сопротивления элементов деревянных конструкций в зависимости от условий эксплуатации, породы древесины и других факторов;
- **Древесина** – приводятся данные о максимально допустимой влажности древесины, а также типы и марки требуемых клеев (для клееной древесины);
- **Предельные гибкости** – определяется предельная гибкость для различного вида элементов деревянных конструкций.
- Группа **Расчет** включает режимы:
- **Геометрические характеристики** – определяются геометрические характеристики деревянных сечений трех видов – прямоугольного, круглого и двутавра;
- **Расчетные длины** – вычисляются расчетные длины для отдельно стоящих колонн и стоек;
- **Сопротивление соединений** – определяется несущая способность соединений из различных сортов древесины на врубках или нагелях;
- **Сопротивление сечений** – анализ несущей способности сечений из клееной и неклееной древесины;
- **Неразрезные прогоны** и **Консольно-балочные прогоны** – проверка прогонов различного вида прямоугольного и круглого сечений из клееной и неклееной древесины по прочности, устойчивости и прогибу;
- **Балки** – проверка обычных и двускатных балок по прочности, устойчивости и прогибу;
- **Стойки** – реализован весь комплекс проверок конструкции стоек и колонн по прочности, устойчивости и гибкости;
- **Элемент фермы** – анализ несущей способности элементов фермы по гибкости, прочности и устойчивости;
- **Фермы** – расчет и проверка ферм различной конфигурации по прочности, устойчивости и гибкости;
- **Арки –** проверка прочности и устойчивости арок из клееной древесины прямоугольного сечения.

### Программа ЗАПРОС

Программа предназначена для выполнения расчетов и проверок элементов оснований и фундаментов на соответствие требованиям СНиП 2.02.01-83*, СП 50-101-2004, СНиП 2.02.03-85, СП 50-102-2003, СП 22.13330.2011, СП 24.13330.2011 и ДБН В.2.1-10-2009. Кроме того, в программе предусмотрена возможность получения справочных данных, наиболее часто используемых при проектировании оснований и фундаментов. Реализованные в программе расчетные и информационные функции объединены в группы по следующим разделам: **Фундаменты**, **Сваи**, **Полевые испытания свай**, **Информация**.

В разделе **Фундаменты** выполняются следующие операции: определение крена прямоугольного в плане фундамента от действующих на него нагрузок; расчет основания по деформациям прямоугольных в плане столбчатых и ленточных фундаментов, а также жестких плит; определение коэффициентов жесткости основания, состоящего из конечного числа слоев, каждый из которых является линейно-деформируемым и постоянным по толщине; вычисление предельного давления под подошвой фундамента (расчетного сопротивления грунта).

В раздел **Сваи** включено два информационных режима – **Коэффициенты условий работы сваи** и **Номенклатура свай**, а также следующие расчетные режимы: определение несущей способности сваи, работающей на вертикальную нагрузку; определение коэффициента запаса устойчивости основания, минимального и максимального изгибающего момента и поперечной силы в сечении сваи, а также ряда других характеристик сваи; определение осадки сваи, работающей на вертикальную нагрузку.

Раздел **Полевые испытания свай** включает расчет на определение несущей способности свай по результатам их динамических испытаний; определение несущей способности забивной (натурной) висячей сваи, работающей на сжимающую нагрузку, по результатам испытаний грунтов эталонной сваей; определение несущей способности забивной (натурной) висячей сваи, работающей на сжимающую нагрузку, по результатам испытаний грунтов сваей-зондом; определение несущей способности забивной (натурной) висячей сваи, работающей на сжимающую нагрузку, по результатам испытаний грунтов статическим зондированием.

**Справочные режимы** обеспечивают просмотр предельных значений относительной разности осадок, крена и средней или максимальной осадки для сооружений различного типа, приведенные в приложении 4 СНиП 2.02.01-83* (Приложение Е СП 50-101-2004, Приложениях Д, Ж, Л СП 22.13330.2011 или Приложении И ДБН В.2.1-10-2009); дают информацию о: **расчетных сопротивлениях грунтов** различного вида, приведенную в Приложении 3 СНиП 2.02.01-83* (Приложение А СП 50-101-2004, Приложение В СП 22.13330.2011, Приложение Е ДБН В.2.1-10-2009); **характеристиках грунтов**, приведенную в приложении 1 СНиП 2.02.01-83* (Приложение Г СП 50-101-2004, Приложение Б СП 22.13330.2011, Приложение В ДБН В.2.1-10-2009.); а также **коэффициенты условий работы** из таблицы 3 СНиП 2.02.01-83* (табл. 5.2 СП 50-101-2004, табл. 5.4 СП 22.13330.2011, табл. Е.7 ДБН В.2.1-10-2009).

## 1.3. Проектно-конструкторские программы

Проектно-конструкторские программы **Монолит** и **КОМЕТА** служат для разработки конструкторской документации на стадии детальной проработки проектного решения.

### Программа Монолит

Программа предназначена для проектирования железобетонных монолитных ребристых перекрытий, образованных системой плит и балок, опирающихся на колонны и/или стены, и разработана в соответствии с требованиями действующих норм (СНиП 2.03.01-84*, ГОСТ 21.501-93, ГОСТ 21.101-97, СНиП 52-01-2003, СП 52-101-03, СП 63.13330).

Общая схема перекрытия компонуется на ортогональной сетке узлов, имеющих последовательную нумерацию. Узлы располагаются в местах пересечения конструктивных элементов перекрытия — балок, стен, колонн. Плиты перекрытия постоянной толщины приняты расположенными в уровне верхней грани балок. Балки прямоугольного сечения (таврового с полкой у верхней грани) подразделяются на второстепенные, воспринимающие равномерно распределенную нагрузку от плит перекрытия, и главные, несущие нагрузку от второстепенных балок перпендикулярного

направления. Опорами перекрытия служат несущие стены здания и/или колонны монолитного каркаса. При этом условия опирания перекрытия на стены определяются материалом стен: кирпичных, предусматривающих свободное безмоментное опирание балок и плит, и бетонных, монолитно связанных с перекрытием и обеспечивающих жесткое, моментное сопряжение балок и плит с опорной конструкцией. Все несущие элементы сооружения (стены, колонны, балки) могут быть размещены эксцентрично относительно осей, соединяющих узлы разбивочной сетки.

Результатом работы программы является необходимый комплект рабочих чертежей перекрытия: опалубочный план с характерными сечениями, планы верхней и нижней арматуры плиты (раскладка арматурных сеток), арматурные чертежи балок, чертежи сварных каркасов и сеток, использованных для армирования плит и балок, ведомость деталей, ведомости расхода стали по балкам, плитам и сводная, а также спецификации по балкам, плитам и сводная. Приводятся необходимые примечания. Предусмотрена полная унификация арматурных изделий.

Все выходные документы готовятся в стандартном формате большинства используемых печатающих устройств А4, А3. Но можно выводить их и на устройства другого формата, а также плоттер. Для доработки выходных документов предусмотрена возможность импорта результатов в форматы DXF-файлов системы AutoCAD.

### Программа КОМЕТА

Программа предназначена для расчета и проектирования узлов стальных конструкций зданий и сооружений в промышленном и гражданском строительстве. Реализован подход, в котором при проектировании используется набор параметризованных конструктивных решений узлов (прототипов). В процессе проектирования параметры прототипов изменяются в зависимости от заданных условий применения (усилий, материала и т. п.) и установленных норм проектирования.

Основной задачей, решаемой программой, является получение технического решения узла, соответствующего выбранному варианту норм проектирования, которое удовлетворяет заданным условиям применения. Результатом работы является чертеж узла и данные о прочности его отдельных элементов (деталей конструкции, сварных швов, болтов и т. д.). Последние дают возможность пользователю оценить качество полученного технического решения и, при желании, изменить некоторые из параметров конструкции.

В программе реализованы следующие прототипы узлов: жесткие, шарнирные и полужесткие примыкания балок к колонне, шарнирные базы колонн, жесткие базы колонн без ребер, с ребрами и с траверсами, стыки балок на болтах и фланцевые соединения, узлы ферм.

Примыкания двутавровых балок к колонне реализованы в виде сварных и фланцевых соединений на обычных и высокопрочных болтах. Примыкания могут быть горизонтальными и наклонными, с вутами и без них, с учетом усиления колонны и без усиления.

Предусмотрена возможность экспорта графических результатов работы в формат DXF-файлов системы AutoCAD.

## 1.4. Вспомогательные программы

### Программа Конструктор сечений

Программа предназначена для формирования произвольных составных сечений из стальных прокатных профилей и листов, а также расчета их геометрических характеристик, необходимых для выполнения расчета конструкций. Вычисления выполняются по обычным правилам сопротивления материалов, при этом момент инерции при свободном кручении приближенно определен как сумма моментов инерции свободного кручения профилей, составляющих сечение. По результатам расчета геометрических характеристик сечения формируется отчет.

Результаты расчета геометрических характеристик могут экспортироваться в вычислительный комплекс **SCAD**, а также в программу **Кристалл**.

### Программа Консул

Программа предназначена для формирования произвольных сечений, а также расчета их геометрических характеристик, исходя из теории сплошных стержней.

В результате расчета могут быть получены следующие основные характеристики — площадь поперечного сечения, значения моментов инерции, радиусы инерции, моменты сопротивления, крутильные и секториальные характеристики, координаты центра изгиба.

Графические интерактивные средства обеспечивают формирование сложных сечений произвольной формы с отверстиями и включают функции сглаживания углов, корректировки контура сечения и координат вершин, переноса группы выбранных вершин. В программе предусмотрен импорт сечений из файлов форматов DXF и DWG, а также работа с параметрическими сечениями, заданными пользователем.

Вычисленные геометрические характеристики могут быть использованы в комплексе **SCAD** при задании жесткостных характеристик элементов.

### Программа ТОНУС

Программа предназначена для формирования сечений, а также расчета их геометрических характеристик, исходя из теории тонкостенных стержней.

В результате расчета могут быть получены следующие основные характеристики — площадь поперечного сечения, значения моментов инерции, радиусы инерции, моменты сопротивления, крутильные и секториальные характеристики, координаты центра изгиба.

Графические интерактивные средства обеспечивают формирование произвольных (в том числе открыто-замкнутых) тонкостенных сечений. В программе предусмотрен импорт сечений из файлов форматов DXF и DWG, а также работа с параметрическими сечениями, заданными пользователем.

Вычисленные геометрические характеристики могут быть использованы в комплексе **SCAD** при задании жесткостных характеристик элементов.

### Программа СЕЗАМ

Программа предназначена для поиска сечения типа коробка, двутавр, тавр или швеллер, наиболее близко аппроксимирующего заданное произвольное сечение по геометрическим характеристикам. Учитывая, что все нормативные документы ориентированы на проверку сечений только определенного типа, полученное в результате аппроксимации сечение может быть использовано в расчетных программах для учета упругопластической стадии работы, проверки устойчивости плоской формы изгиба, выпучивания из силовой плоскости и других проверок.

Исходное сечение может быть задано как файл, полученный в результате работы программ **Конструктор сечений**, **Консул** и **ТОНУС**, набором геометрических характеристик или как составное сечение из предлагаемого в программе набора прототипов (например, два швеллера, два двутавра, и т. д.).

Для заданного сечения аппроксимируются следующие характеристики: площадь, главные моменты инерции, моменты сопротивления.

## Программа ВеСТ

Программа предназначена для выполнения расчетов, связанных с определением нагрузок и воздействий на строительные конструкции в соответствии с рекомендациями СНиП 2.01.07-85* «Нагрузки и воздействия» (рис. 1.4-1), СП 20.13330.2011 или ДБН В.1.2.2-2006.

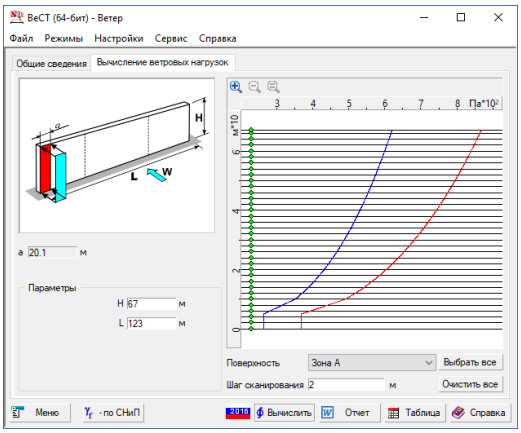



Рис. 1.4-1. *Определение ветровой нагрузки в программе* **ВеСТ**

Расчетные режимы включают:

- **Собственный вес** — определение значений нагрузки, приходящейся на единицу площади, от собственного веса многослойного пакета из различных материалов;
- **Временные** — определяются значения равномерно распределенных временных нагрузок (полных и пониженных значений) в различных помещениях в соответствии с указаниями СНиП;
- **Ветер** — вычисление статической компоненты ветровых нагрузок для сооружений различного типа из числа предусмотренных СНиП;
- **Снег** — вычисление снеговых нагрузок для сооружений различного типа из числа предусмотренных СНиП;
- **Температура** — определение температурных воздействий по СНиП.

## Программа Откос

Программа предназначена для определения коэффициента запаса устойчивости откосов и склонов. В качестве механизма потери устойчивости принимается механизм скольжения оползающего массива относительно неподвижной части откоса. Сопротивление сдвигу по поверхности скольжения рассчитывается для статических условий. Вдоль всей поверхности выдерживается критерий разрушения грунта, принимаемый в виде закона Кулона.

Реальное сдвигающее напряжение, получаемое расчетом, сопоставляется с предельным сопротивлением сдвигу, и результат этого сравнения выражается в виде коэффициента запаса устойчивости. Коэффициент запаса устойчивости склона (откоса) – это минимальный из коэффициентов запаса устойчивости по всем возможным поверхностям скольжения, удовлетворяющим заданным ограничениям, заложенным в методе расчета.

Исходные данные включают:

- размеры оползневого участка склона;
- глубину закола (если активен маркер наличия закола);
- характеристики грунтов;
- положение и характеристики скважин;
- нагрузки, действующие на указанные участки склона.

## Программа Кросс

Программа предназначена для определения коэффициентов постели для расчета фундаментных конструкций на упругом винклеровском основании на основе моделирования работы

многослойного грунтового массива. Геологическая структура грунтового массива предполагается произвольной и восстанавливается по данным инженерно-геологических изысканий.

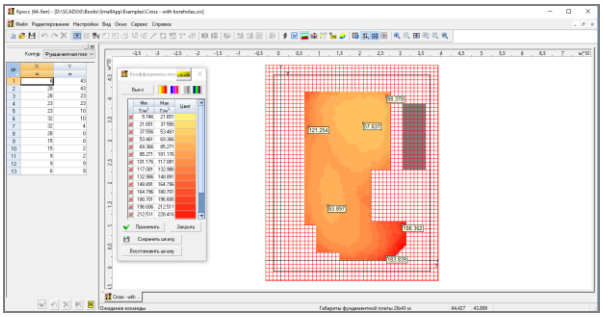


Рис. 1.4-2. *Определение коэффициентов постели для фундаментной плиты*

Рассматривается площадка строительства, на которой расположены проектируемое сооружение и другие объекты, влияющие на него в том смысле, что нагрузки на грунт, передаваемые этими объектами, могут привести к осадкам проектируемого фундамента.

Результатом работы программы являются значения коэффициентов постели в любой точке основания проектируемого сооружения (рис. 1.4-2). Предусмотрены режимы автоматической передачи геометрии основания из комплекса **SCAD** и возврат результатов расчета в комплекс.

## 1.5. Сервисные функции

Кроме проектно-аналитических, проектно-конструкторских и вспомогательных программ системы **SCAD Office** комплекс **SCAD** имеет ряд сервисных функций-программ такие, как: **КоКон**, **Куст**, **Каталоги металлопроката**, **Калькулятор для расчета по формулам**, **Калькулятор для преобразования единиц измерения** и другие, которые описаны в главе 30 **Сервисные функции** этой книги.

# 2. Теоретические основы

*От расчетчика-пользователя программными комплексами, интересующегося напряженно-деформированным состоянием, не требуется детального знания всех математических, вычислительных и компьютерных проблем. Однако ему необходимо иметь представление о том, как математически формулируются задачи и что представляют собой численные методы их решения. Без этого трудно рационально выбрать расчетную схему и правильно оценить достоверность окончательных результатов.*

*Л.А. РОЗИН*. Задачи теории упругости и численные методы их решения. — Санкт-Петербург: СПбГТУ, 1998. С.5

Краткие сведения о подходах к расчету и методах решения задач, положенных в основу комплекса **SCAD**, излагаются в этой главе в том объеме, который полезно знать пользователю для лучшего понимания дальнейших указаний и для анализа ситуаций, возникающих в процессе решения конкретной задачи. Эти сведения не заменяют знакомство со специальной литературой, на которую даются ссылки в тексте, но могут служить в какой-то мере путеводителем по этой литературе. Кроме того, более детально рассматриваемые вопросы освещены в книге [11], которую можно рассматривать в качестве дополнительной документации комплекса **SCAD**.

## 2.1. Конструкция и ее расчетная схема

### Общие сведения

Расчетный анализ любой конструкции начинается с попытки установить, что именно в рассматриваемом случае является существенным, а чем можно пренебречь. Такого рода упрощение задачи производится всегда, поскольку выполнение расчета с учетом всех свойств реальной конструкции возможно лишь с определенной степенью приближения.

Реальная конструкция, освобожденная от всех несущественных особенностей и представленная в связи с этим в некоторой идеализированной форме, носит название ***расчетной схемы***. Некоторые методы схематизации получили широкое распространение и имеют общий характер (идеализация материала в виде сплошной среды; предположение об однородности материала; приведение геометрической формы тела к таким стандартным схемам, как стержни, пластины или оболочки; схематизация внешних сил и др.). Другие методы схематизации вполне конкретны и связываются с каждой рассматриваемой задачей. Однако во всех случаях выбор расчетной схемы является важнейшим элементом анализа, одной из наиболее характерных черт инженерного искусства (здесь — именно искусства, а не научного анализа!) и характеризует уровень профессионального мастерства расчетчика.

Как и любому другому виду искусства, искусству выбора расчетных схем можно научить только в процессе практической работы. Поэтому далее этой проблеме мы не будем уделять внимание[1]. Однако после того как расчетная схема (быть может, лишь в общих чертах) установлена, наступает этап ее детального описания в форме, пригодной для выполнения расчетного анализа, и этому этапу далее посвящены конкретные рекомендации.

Что же касается общих сведений, то следует иметь в виду, что на ранних стадиях создания расчетной схемы следует принять решение о том, будет ли расчет выполняться как *линейный* или как *нелинейный*, следует ли учитывать силы инерции и выполнять *динамический* расчет или можно ограничиться *статическим* анализом.

Об ожидаемом поведении конструкции судят на основании накопленного опыта и инженерной интуиции, и поэтому все принятые решения подлежат апостериорной оценке. Если во всех разрешающих уравнениях, описывающих поведение системы, могут быть проигнорированы

[1] Проблема перехода от конструкции к расчетной схеме и обратно — от расчетной схемы к конструкции подробно обсуждается в прекрасной книге В.И. Феодосьева [15], которую мы рекомендуем всем расчетчикам. Поучительные и тонкие соображения, относящиеся к этому же вопросу, содержатся и в монографии И.И. Блехмана, А.Д. Мышкиса и Я.Г. Пановко [1].

производные по времени, то речь идет о статической задаче и, следовательно, об анализе поведения неподвижной системы. В задачах динамики, когда существенную роль играют силы инерции, пропорциональные ускорениям масс, и в задачах ползучести, когда учитываются скорости, речь должна идти об анализе движущейся системы.

Нелинейные задачи могут быть связаны с эффектами, возникающими при изменении геометрии системы под нагрузкой (*геометрическая* нелинейность), отсутствием пропорциональности между напряжениями и деформациями (*физическая* нелинейность), возможным включением и выключением из работы односторонних связей при действии нагрузки на систему (*конструктивная* нелинейность) или с эффектами, определяемыми переменностью структуры системы в процессе ее создания (*генетическая* нелинейность).

Все эти особенности ожидаемого поведения конструкции сказываются на выборе расчетной схемы, например, при определении возможных степеней свободы или при схематизации нагрузок, действующих на систему.

Особенно серьезным вопросом является разбиение системы на конечные элементы, т. е. на стандартные части, из которых (и только из них!) должна состоять вся система.

Чрезмерно мелкое дробление приводит к увеличению времени расчета и связано с запросом на использование больших ресурсов памяти компьютера для хранения и обработки данных. Могут при этом проявляться и эффекты неустойчивости самого процесса расчета. Слишком грубое дробление может привести к потере точности результатов, особенно в тех случаях, когда рассчитываются пластинчатые или оболочечные конструкции.

Общих рекомендаций по выбору оптимального уровня дробления системы на конечные элементы не существует. Имеющиеся «оценки сходимости» имеют асимптотический характер (см., например, [6, 14]) и часто являются слишком абстрактными для конструктивного использования в конкретном случае расчета. Поэтому здесь приходится полагаться, главным образом, на опыт и результаты некоторых контрольных расчетов, выполняемых для одной и той же конструкции при различных системах разбиения на конечные элементы. Могут быть также рекомендованы приемы последовательной серии расчетов некоторых фрагментов системы с введением на этих фрагментах более детального разбиения на конечные элементы.

## Расчетная схема метода перемещений

Поскольку в основу используемых алгоритмов положен метод перемещений[1], то идеализация конструкции должна быть выполнена в форме, приспособленной к использованию этого метода, а именно: система должна быть представлена в виде набора тел стандартного типа (стержней, пластин, оболочек и т. д.), называемых конечными элементами и присоединенных к узловым точкам.

Эти конечные элементы должны быть заранее изучены, чтобы иметь возможность определить их реакцию на единичные смещения и повороты узлов. Описание конечных элементов, используемых в комплексе **SCAD**, дано в главе 3.

Узел в расчетной схеме метода перемещений представляется в виде абсолютно жесткого тела исчезающе малых размеров. Положение узла в пространстве при деформациях системы определяется координатами центра и направлениями трех осей, жестко связанных с узлом. Иными словами, узел представляется как объект, обладающий шестью степенями свободы — тремя линейными смещениями, определяемыми как разности координат в деформированном и недеформированном состояниях, и тремя углами поворота. С узлами могут быть связаны и другие параметры, определяющие деформированное положение системы (дополнительные степени свободы).

В методе перемещений *элементы системы считаются присоединенными только к узлам расчетной схемы*. Указанная особенность построения расчетной схемы не всегда подчеркивается в учебной и справочной литературе. Такой подход является приближенным, поскольку, приводя эквивалентные усилия к узлам, условия равновесия конечных элементов некоторых типов (например, пластин и оболочек) можно выполнить только интегрально. На межэлементных

[1] Имеется в виду общая система разрешающих уравнений, где неизвестными являются смещения и повороты узлов. Некоторые типы конечных элементов (гибридные элементы) внутри себя используют и силовые неизвестные, но они исключаются перед формированием общей системы уравнений.

границах нестержневых элементов мыслятся возможные разрезы, что заставляет обращать внимание на т. н. свойство совместности (конформности) элементов. Совместные элементы гарантируют совпадение перемещений и их необходимых производных для точек, расположенных на противоположных берегах разреза. Для несовместных элементов возникает необходимость выполнения дополнительных условий, компенсирующих возможные расхождения берегов разреза.

Следует отметить, что все представленные в библиотеке комплекса **SCAD** элементы либо являются совместными, либо для них гарантируется выполнение дополнительных условий компенсации несовместности.

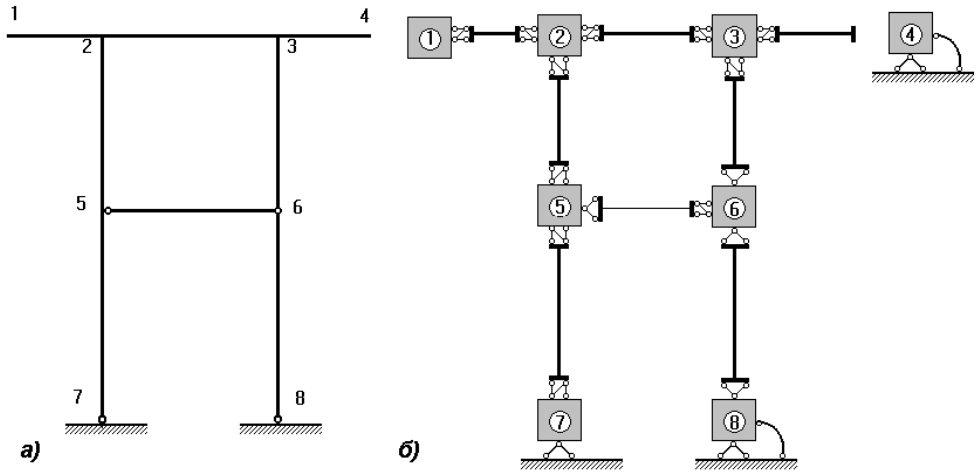



Рис. 2.1-1. *Изображение расчетной схемы*: *а* — традиционное; *б* — детальное

Условия примыкания элементов к узлам не всегда видно при использовании традиционных способов изображения расчетной схемы. Так, расчетная схема, показанная на рис. 2.1-1, *а* в традиционной форме, может навести на мысль о непосредственном соединении элементов одного с другим, в то время как более детальное изображение на рис. 2.1-1, *б* позволяет избежать такого заключения. Заметим также, что в детальном изображении видны и другие особенности реализации расчетной схемы, в частности, возможность выполнения одинаковых кинематических условий с использованием различных наборов связей (сравните узлы 1 и 4 или 7 и 8). Однако, этот прием не всегда безобиден. Например, с точки зрения кинематических свойств задачи два варианта расчетной модели, представленные на рис. 2.1-2, равноправны (балка, защемленная на левом конце и шарнирно опертая на правом).

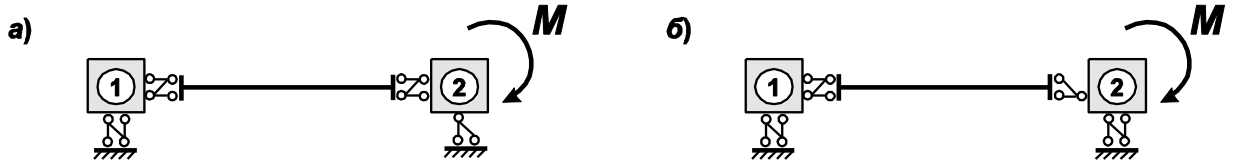



Рис. 2.1-2. *Два варианта представления одной и той же расчетной схемы*

Но с точки зрения задания усилий варианты различаются. Так, схема по рис. 2.1-2, *а* передает заданный внешний момент *M* на стержень, и узел 2 в этой схеме будет иметь поворот, а схема по рис. 2.1-2, *б* не передает момент, и узел 2 этой схемы будет иметь нулевой угол поворота. Чтобы и в схеме по рис. 2.1-2, *б* возникал изгибающий момент в стержне, его следует считать не узловым, а приложенным к стержню в сечении около узла. С другой стороны, в схеме по рис. 2.1-2, *а* в результате расчета можно получить угол поворота в точке, где расположен узел 2, и он равен углу поворота правого концевого сечения стержня, а в схеме по рис. 2.1-2, *б* поворот концевого сечения не определяется, поскольку в комплексе **SCAD** предусмотрена выдача значений только для узловых перемещений и поворотов.

Предполагается, что вся расчетная схема состоит только из элементов заранее определенного типа. Список типов элементов, которыми оперирует вычислительный комплекс, может видоизменяться и пополняться, однако каждой его конкретной версии соответствует определенный

набор элементов — библиотека конечных элементов (БКЭ), из которой и выбираются «элементарные частицы» для формирования расчетных схем.

Наконец, следует заметить, что все узлы и элементы расчетной схемы нумеруются. Номера, присвоенные им, следует трактовать только как имена, которые позволяют делать необходимые ссылки. Например, можно указать узел, где приложена некоторая нагрузка, перечислить узлы, к которым присоединен вполне конкретный элемент, составить список элементов, примыкающих к определенному узлу (это будет т. н. «звезда элементов» в узле) или входящих в определенную, назначенную нами, группу. Никаких других функций нумерация не выполняет, и она практически не влияет на время решения задачи благодаря имеющейся в комплексе возможности оптимизации профиля матрицы жесткости. Однако выдача результатов расчета чаще всего производится в порядке нумерации узлов (перемещения) или элементов (внутренние усилия), поэтому говорить о полной независимости от нумерации все же не приходится.

### Основные и дополнительные неизвестные

Основная система метода перемещений выбирается, как обычно, путем наложения в каждом узле всех связей, запрещающих любые узловые перемещения. Условия равенства нулю усилий в этих связях представляют собой разрешающие уравнения равновесия, а смещения указанных связей — основные неизвестные метода перемещений.

В обычных пространственных конструкциях в узле могут присутствовать все шесть смещений:

1 — линейное перемещение вдоль оси X;
2 — то же, вдоль оси Y;
3 — то же, вдоль оси Z;
4 — угол поворота с вектором вдоль оси X (поворот вокруг оси X);
5 — то же, вдоль оси Y (поворот вокруг оси Y);
6 — то же, вдоль оси Z (поворот вокруг оси Z).

Нумерация смещений (степеней свободы), приведенная выше, используется далее всюду без специальных оговорок, а в документации также используются соответственно символы: $X$, $Y$, $Z$, $U_X$, $U_Y$ и $U_Z$ для обозначения величин соответствующих линейных перемещений и углов поворота. Если в некотором узле какое-либо из перемещений не влияет на напряженное состояние всех элементов, примыкающих к этому узлу (например, повороты узла, к которому примыкают только стержни с шарнирами на концах, как это бывает при расчете ферм), то соответствующее перемещение не входит в число основных неизвестных.

Может оказаться, что вся система обладает такими свойствами, и в каждом ее узле присутствует один и тот же сокращенный набор неизвестных перемещений или точнее — некоторые из перемещений не присутствуют среди степеней свободы ни одного из узлов системы. Тогда можно это свойство системы (признак системы) специально обозначить, и в дальнейшем принципиально не оперировать с некоторыми из перемещений. Вот некоторые из примеров:

- плоская ферма, размещенная в плоскости XOZ — можно указать, что заведомо не рассматриваются перемещения вдоль оси Y и все углы поворота ($U_X$, $U_Y$, $U_Z$);
- плита в плоскости XOY — исключаются перемещения вдоль осей X и Y и угол поворота $U_Z$.

В некоторых случаях узлу расчетной схемы приписываются дополнительные степени свободы (дополнительные неизвестные), которые уже не отождествляются с компонентами линейных или угловых перемещений узла как бесконечно малого жесткого тела в точке, совпадающей с центром узла. Таким дополнительным неизвестным, например, может быть вторая смешанная производная (кручение) деформированной поверхности плиты или компоненты деформаций поперечного сдвига и обжатия в слоистых кусочно-неоднородных пологих оболочках.

### Внешние и внутренние связи

В силу особенностей конструктивного решения на некоторые из узловых перемещений могут быть наложены ограничения (связи). Говорят, что на систему наложена *моносвязь*, если она запрещает одну из компонент узлового перемещения (например, $X = 0$ или $U_Y = 0$). Если же в силу наложенной на систему связи аннулируется некоторая линейная комбинация компонент узловых перемещений, то говорят о *полисвязи* [11]. Моносвязь всегда является внешней связью, поскольку она как бы

извне системы ограничивает ее перемещения. Полисвязь, наложенная на компоненты узловых перемещений одного и того же узла, также является внешней, только направление запрещенного перемещения не совпадает с осями координат, а ориентировано под некоторым углом (например, полисвязь $X_i\cos\varphi + Y_i\sin\varphi = 0$ ориентирована под углом φ к координатной оси X). Другие полисвязи, где фигурируют компоненты перемещений различных узлов, являются внутренними и чаще всего обусловлены наличием в системе (в ее расчетной схеме) абсолютно жестких элементов.

Необходимо отметить, что при выборе расчетной схемы следует опасаться того, чтобы бесконечно жесткие элементы, моделирующие внутренние связи, не образовали статически неопределимую систему, например, замкнутый контур. Система тогда становится вырожденной, а усилия в ней распределяются не единственным способом.

Другой, в некотором смысле противоположной, опасностью при создании расчетной схемы является пропуск связи, т. е. отсутствие запрета на перемещение, приводящее к появлению геометрической изменяемости. В комплексе **SCAD** в процессе расчета осуществляется контроль геометрической изменяемости и, в случае ее обнаружения, выполняется корректировка схемы путем наложения дополнительных связей. Однако пользователь всегда должен помнить о том, что изменяемость может быть следствием его недосмотра и внимательно оценивать «услугу» системы по исправлению обнаруженной ошибки. В частности, такая корректировка справедлива лишь тогда, когда реакции в автоматически установленных дополнительных связях равны нулю, и по направлению данного смещения не действует нагрузка.

Расчет системы, на которую наложены моносвязи, достаточно прост — соответствующие узловые перемещения исключаются из числа основных неизвестных. В связи с этой простотой возникает естественное стремление описать в виде моносвязей и те внешние связи, которые запрещают перемещения или повороты, не ориентированные вдоль координатных осей.

Можно попытаться запретить любое перемещение и путем установки некоторых дополнительных элементов, придав им достаточно большую жесткость, однако такой прием является приближенным и может привести к существенной потере точности, хотя и имеет то преимущество, что позволяет определить реакцию введенной связи. Более широкие возможности предоставляет использование специальных «нуль-элементов», которые, кроме всего прочего, позволяют выполнить расчет на заданное смещение [10].

### Условия сопряжения элементов с узлами системы

Примыкающие к узлам системы узлы (расположенные в концевых сечениях стержней) элементов геометрически могут располагаться в некотором удалении от центра узла схемы, т. е. может иметь место эксцентриситет примыкания. Будем считать, что для тех типов элементов, где такой эксцентриситет допустим, узел (концевое сечение) элемента соединен с центром узла схемы бесконечно жесткой вставкой, и эта вставка является частью конечного элемента (см. описание конечных элементов стержневого типа в главе 3 **Библиотека конечных элементов**).

Естественно, что при наличии упомянутой бесконечно жесткой вставки перемещение концевого сечения элемента не равно перемещению узла схемы (оно зависит также и от узловых поворотов), а углы поворота узла и концевого сечения совпадают.

Несовпадение перемещений (поворотов) узла и связанного с узлом схемы концевого сечения элемента может иметь место и в силу особенностей конструкции примыкания. Если считать, что элементы могут быть прикреплены своими узлами к центрам узлов схемы шестью связями, каждая из которых препятствует одному из шести возможных взаимных перемещений, то можно представить себе и отсутствие любой из этих шести связей. Отсутствие одной связи между угловыми перемещениями соответствует цилиндрическому шарниру, отсутствие трех связей для всех взаимных угловых перемещений — сферическому шарниру, отсутствие связи между линейными смещениями — «ползуну» и т. п. Для краткости в дальнейшем все такие случаи называются «шарнирами», хотя в этом есть и определенная неточность. Необходимо отметить, что использование различных типов соединений элементов с узлами и связей, накладываемых на узловые перемещения, позволяет разнообразить описание расчетной схемы, что иллюстрируется на рис. 2.1-1. Рекомендуем сравнить равноценные, но по-разному представленные условия примыкания в парах узлов 1 и 4 или 7 и 8.

Следует заметить, что возможность введения неполного совпадения перемещений узла элемента и узла схемы, равно как и возможность эксцентричного примыкания, предусмотрена не для всех типов элементов, поэтому необходимо руководствоваться соответствующими указаниями из описания конечных элементов. Обход имеющихся запретов возможен с использованием искусственных приемов (введение дополнительных узлов, весьма податливых элементов-связей и др.).

### Группы, подсхемы, суперэлементы

Расчетную схему часто удобно представить в виде объединения различных фрагментов, каждый из которых имеет смысл рассматривать как нечто целое. Именованные фрагменты названы в комплексе **SCAD** *группами*. Группами могут быть функционально связанные части (например, каркас одного из этажей многоэтажного здания) или части с общей конструктивной системой (перекрытие, стена), или, наконец, чисто геометрически отличающаяся часть системы (например, одна из граней многогранной оболочки). В комплексе **SCAD** допускается создавать группы из любых компонентов расчетной модели (узлов, элементов, нагрузок) и их сочетаний.

Далее, говоря о группе, мы будем иметь в виду часть схемы, выделяемую из системы по критерию, назначаемому расчетчиком. Однако сам по себе вычислительный комплекс никаких операций с группой не производит, и все, что нужно сделать в процессе расчета, пользователь должен определить сам (произвести унификацию, подобрать арматуру, выдать результаты на печать и т. п.).

В комплексе **SCAD** имеется возможность использовать фрагменты, представленные как самостоятельные схемы, при выполнении определенных операций (главным образом, в процессе ввода информации). Такие фрагменты будем называть *подсхемами*. Подсхема имеет все черты расчетной схемы, она состоит из узлов и элементов, имеет связи, шарниры и т. д. При создании системы с подсхемой обращаются как с единым целым, определяя ее место в системе (основной схеме) путем совмещения некоторых узлов подсхемы, играющих роль узлов обычного конечного элемента, с узлами основной схемы.

Подсхема, используемая не только при вводе информации, но и при организации вычислительного процесса, называется *суперэлементом.* Суперэлементное моделирование целесообразно использовать в тех случаях, когда один и тот же суперэлемент входит в схему неоднократно. Тогда результаты вычислений, выполненных для первого из общего числа однотипных суперэлементов, используются и для всех других его повторений, что существенно сокращает количество вычислений.

### Нагрузки и воздействия

Взаимодействие системы с окружающей средой представляется обычно в виде нагрузок или воздействий, приложенных к узлам системы (*узловых нагрузок*) или к внутренним точкам ее конечных элементов (*местных нагрузок*). Местные нагрузки могут быть силами и моментами, сосредоточенными или распределенными по линиям, площадям и объемам. Иногда загружение системы представляется в форме температурных воздействий на элементы или заданными смещениями в узлах, т. е. эти воздействия проявляются не как силовые, а как кинематические факторы.

Если воздействия меняются во времени, то вызванные ими ускорения масс системы приводят к появлению инерционных сил. В тех случаях, когда силами инерции пренебречь нельзя, говорят о *динамическом* характере воздействия, но всегда следует помнить, что отнесение воздействий к виду статических или динамических связано не только с их собственными свойствами, но и с *инерционными характеристиками системы*.

В практике проектирования используются *нормативные и расчетные значения нагрузок*. Переход от одних к другим выполняется с помощью коэффициента надежности по нагрузке. Вообще говоря, нормативные и расчетные значения используются в расчетах разного рода: нормативные — для проверки второго предельного состояния, расчетные — для проверки первого предельного состояния. В комплексе **SCAD** по умолчанию предполагается, что нагрузки задаются своими расчетными значениями.

Совокупность нагрузок и воздействий, одновременно приложенных к системе и рассматриваемых совместно, называется ее *загружением*. Иногда к одному загружению относят лишь ту часть одновременно приложенных нагрузок, которая связана с общим происхождением (например, только силы давления колес одного мостового крана или нагрузки от снега на покрытие

лишь в одном пролете многопролетного здания) или же имеет какие-то другие общие свойства (например, установленный нормами коэффициент надежности по нагрузке). Если впоследствии возникает необходимость учета эффекта совместного действия нескольких загружений такого рода (их сумму, взятую с некоторыми коэффициентами), то говорят о *комбинации загружений* и, соответственно, о коэффициентах такой комбинации.

Поскольку загружения могут в различные моменты времени образовывать различные комбинации, и возможное число таких комбинаций (сочетаний) достаточно велико, то возникает нетривиальная задача отыскания таких сочетаний внешних воздействий, которые приводят к наиболее неблагоприятным последствиям для некоторого проверяемого элемента или его сечения. В этом случае имеется в виду отыскание *расчетного сочетания усилий* (**РСУ**). Решая эту задачу, следует помнить о логической связи между загружениями, определяемыми природой действующих на систему нагрузок или же указаниями нормативных документов. Такие логические связи иногда определяют невозможность одновременного действия (несовместность) некоторых нагрузок, таких, например, как ветровой напор от ветров различного направления. В других случаях, наоборот, требуется обязательный учет какого-либо загружения при рассмотрении вполне определенного другого загружения (например, сила трения возможна лишь при одновременном учете еще и силы нормального давления), хотя обратная связь такого рода может и отсутствовать (нормальное давление при отсутствии трения вполне можно рассматривать самостоятельно).

Необходимо отметить, что использование *комбинаций загружений* или же отыскание РСУ основано на принципе суперпозиции и, следовательно, имеет смысл лишь для *линейных систем*. При учете нелинейности любого рода необходимо описывать все действующие на систему нагрузки в рамках одного загружения.

## 2.2. Основные соотношения метода конечных элементов

### Линейная статическая задача

Теоретической основой комплекса **SCAD** является метод конечных элементов (**МКЭ**) в форме метода перемещений. Выбор именно этой формы объясняется простотой алгоритмизации и физической интерпретации, возможностью создания единых методов построения матриц жесткости и векторов нагрузок для различных типов конечных элементов, возможностью учета произвольных граничных условий и сложной геометрии рассчитываемой конструкции. Детальное описание метода с подробной аргументацией имеется во многих литературных источниках (см., например, [6, 14]). В этом разделе будет дано лишь конспективное изложение основных расчетных зависимостей.

Напряженно-деформированное состояние каждой материальной точки $x$ конечного элемента, имеющего объем $V$ и поверхность $S$, описывается векторами напряжений $\boldsymbol{\sigma}(x)$ и деформаций $\boldsymbol{\varepsilon}(x)$, которые для линейной задачи теории упругости выражаются через вектор перемещений $\boldsymbol{u}(x)$:

$$\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{M}\boldsymbol{\varepsilon},\ \boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{B}\boldsymbol{u}, \tag{2.2.1}$$

где $\boldsymbol{B}$ — линейный матричный дифференциальный оператор; $\boldsymbol{M}$ — симметричная, положительно определенная матрица упругости закона Гука, зависящая только от жесткостных характеристик материала конструкции.

Полная потенциальная энергия элемента определяется по формуле

$$\Pi^{(e)} = \frac{1}{2}\int_V \boldsymbol{\varepsilon}^T \boldsymbol{M}\boldsymbol{\varepsilon}\, dV - \int_V \boldsymbol{u}^T \boldsymbol{p} dV - \int_S \boldsymbol{u}^T \boldsymbol{q}\, dS, \tag{2.2.2}$$

где $\boldsymbol{p}$ и $\boldsymbol{q}$ — векторы объемных и поверхностных сил соответственно.

Перемещения $\boldsymbol{u}(x)$ любой точки рассматриваемого элемента приближенно представляются через неизвестные смещения узлов $\boldsymbol{Z}$ выражениями вида

$$\boldsymbol{u}(x) = \sum_i \varphi_i(x)\, \boldsymbol{Z}_i = \boldsymbol{\Phi}(x)\, \boldsymbol{Z}_e\ , \tag{2.2.3}$$

где $\varphi_i(x)$ — интерполяционные функции, называемые обычно функциями формы и подчиняющиеся определенным условиям гладкости для обеспечения сходимости метода [14]; $\boldsymbol{\Phi}(x)$ — матрица интерполяционных функций; $\boldsymbol{Z}_e$ — вектор всех неизвестных смещений узлов рассматриваемого элемента (индекс «е»).

Подстановкой (2.2.1) и (2.2.3) в (2.2.2) получаем

$$\Pi^{(e)} = 1/2\, \boldsymbol{Z}_e^T \left( \int_v (\boldsymbol{B\Phi})^T \boldsymbol{MB\Phi}\ dV \right) \boldsymbol{Z}_e - \left( \int_v \boldsymbol{p}^T \boldsymbol{\Phi}\ dV + \int_s \boldsymbol{q}^T \boldsymbol{\Phi}\ dS \right) \boldsymbol{Z}_e \qquad (2.2.4)$$

Выражение (2.2.4) можно представить в следующем виде

$$\Pi^{(e)} = 1/2\, \boldsymbol{Z}_e{}^T \boldsymbol{K}_{(e)} \boldsymbol{Z}_e - \boldsymbol{f}_e{}^T \boldsymbol{Z}_e, \qquad (2.2.5)$$

где $\boldsymbol{K}_{(e)} = \int_v (\boldsymbol{B\Phi})^T \boldsymbol{MB\Phi} dV$ — матрица жесткости элемента;

$\boldsymbol{f}_e^T = \int_v \boldsymbol{p}^T \boldsymbol{\Phi} dV + \int_s \boldsymbol{q}^T \boldsymbol{\Phi} dS$ — вектор приведенных узловых сил.

Полная потенциальная энергия системы получается суммированием по всем ее элементам

$$\Pi = \sum_e \Pi^{(e)}, \qquad (2.2.6)$$

а ее минимизация дает систему разрешающих уравнений МКЭ

$$\boldsymbol{KZ} = \boldsymbol{f} \qquad (2.2.7)$$

с глобальной матрицей жесткости $\boldsymbol{K}$ и вектором узловых сил $\boldsymbol{f}$, полученными путем суммирования соответствующих членов матриц жесткости $\boldsymbol{K}_{(e)}$ и векторов $\boldsymbol{f}_{(e)}$ отдельных конечных элементов, что является преимуществом рассматриваемого подхода.

Для МКЭ в перемещениях известны условия сходимости и оценки погрешности. Условиями сходимости являются линейная независимость и полнота системы базисных функций, а также их совместность (конформность) или условия, компенсирующие несовместность.

Известны легко проверяемые условия, позволяющие установить полноту базисных функций, их совместность или выполнение условий, компенсирующих несовместность. Для полиномиальных аппроксимаций эти условия имеют вид равенств, которым должны удовлетворять базисные функции на каждом конечном элементе. Такая теоретическая основа позволяет не только исследовать корректность применения известных конечных элементов, но и разработать принципы конструирования новых совместных и несовместных элементов, и получить для них оценки погрешности.

Библиотека конечных элементов комплекса содержит большое количество элементов, моделирующих работу различных типов конструкций. Имеются широко известные элементы стержней, четырех- и треугольные элементы для расчета плоского напряженного состояния, плиты, оболочки, элементы пространственной задачи — тетраэдр, параллелепипед, трехгранная призма. В библиотеку включены следующие элементы: несовместные треугольные и прямоугольные элементы изотропных и ортотропных плит и оболочек, плит на упругом основании, многослойных плит и оболочек; построенные методом подобластей совместные четырех- и треугольные элементы для расчета плоского напряженного состояния, плиты и оболочки, допускающие узлы на сторонах. Основой этих элементов являются элементы для расчета плоского напряженного состояния с двумя и плиты с тремя степенями свободы в узле.

Библиотека содержит изопараметрические элементы для расчета плоского напряженного состояния и решения пространственной задачи теории упругости, одно- и двумерный (четырех- и треугольный) осесимметричные элементы. Кроме того, в библиотеке имеются различные специальные элементы, моделирующие связь конечной жесткости, упругую податливость между узлами, нуль-элементы различных видов. Все конечные элементы, включенные в библиотеку, теоретически обоснованы, для них имеются оценки погрешности по энергии и перемещениям. Интегральная погрешность по усилиям оценивается величиной, пропорциональной $h^\tau$, где $h$ — максимальный из размеров конечных элементов, $\tau = 2$ — для прямоугольных элементов плиты, $\tau = 1$ — для остальных элементов. Погрешность по перемещениям оценивается величиной, пропорциональной $h^\tau$, где $\tau = 4$ — для совместных прямоугольных и четырехугольных элементов плиты, $\tau = 2$ — для остальных элементов. Теоретически обоснована также возможность расчета криволинейных стержней с использованием прямолинейных элементов и произвольных оболочек с использованием треугольных и прямоугольных (для цилиндрических оболочек) элементов плоской

оболочки. Погрешность по энергии и перемещениям оценивается в этом случае величиной, пропорциональной *h*.

### Учет дополнительных связей

Если перемещения $\boldsymbol{Z}$ стеснены условиями связи

$$\boldsymbol{CZ} = \boldsymbol{0}, \tag{2.2.8}$$

то только часть компонент вектора $\boldsymbol{Z}$ допускает свободное варьирование, и для учета этих связей в работе [10] было предложено использовать модифицированную функцию Лагранжа

$$\Pi_{LM} = ½\, \boldsymbol{Z}^T(\boldsymbol{K} + \boldsymbol{C}^T\boldsymbol{D}_0\boldsymbol{C})\boldsymbol{Z} - \boldsymbol{Z}^T\boldsymbol{f} + \boldsymbol{\rho}^T\boldsymbol{CZ}, \tag{2.2.9}$$

в которой $\boldsymbol{D}_0$ — некоторая симметричная положительно определенная матрица, а $\boldsymbol{\rho}$ — вектор Лагранжевых множителей (реакций в связях).

Условия стационарности функционала (2.2.9) дают систему уравнений

$$\begin{aligned} \boldsymbol{KZ} + (\boldsymbol{C}^T\boldsymbol{D}_0\boldsymbol{C})\,\boldsymbol{Z} + \boldsymbol{C}^T\boldsymbol{\rho} &= \boldsymbol{f}; \\ \boldsymbol{CZ} &= \boldsymbol{0}. \end{aligned} \tag{2.2.10}$$

Следует отметить, что матрица $\boldsymbol{C}$ должна содержать только линейно независимые строки, в противном случае (постановка дублированных связей) в системе может оказаться статически неопределимая подконструкция, целиком состоящая из абсолютно жестких элементов, что ведет к вырождению задачи. Во всех остальных случаях система уравнений (2.2.10) имеет отличный от нуля определитель, включая и те случаи, когда матрица $\boldsymbol{K}$ вырождена (конструкция без дополнительных связей изменяема), но ее дефект не превышает ранга матрицы $\boldsymbol{C}$.

Добавление к матрице жесткости $\boldsymbol{K}$ произведения $\boldsymbol{C}^T\boldsymbol{D}_0\boldsymbol{C}$ соответствует включению в конструкцию некоторого упругого элемента со специальными свойствами («нуль-элемента»), который включается параллельно бесконечно жесткой связи и поэтому не искажает результаты расчета. В [10] детально рассмотрены возможные способы конструирования таких «нуль-элементов», часть из них использована при разработке комплекса **SCAD**.

### Жесткие тела

Одним из возможных видов полисвязей является случай, когда перемещения некоторых узлов системы связаны друг с другом так, как в случае их объединения абсолютно жестким (твердым) телом. В комплексе **SCAD** абсолютно жесткое тело рассматривается как некоторый специфический тип конечного элемента. С конечным элементом его роднит хотя бы то, что абсолютно жесткое тело объединяет инцидентные этому телу узлы. Грубо говоря, абсолютно жесткое тело может рассматриваться как предельный случай некоторого конечного элемента при устремлении жесткостных характеристик этого элемента к бесконечности.

Жесткое тело можно представить наглядно в виде «паука», состоящего из одного ведущего узла (master node) и множества ведомых узлов (slave nodes) – рис. 2.2-1. Различают полное связывание и частичное.

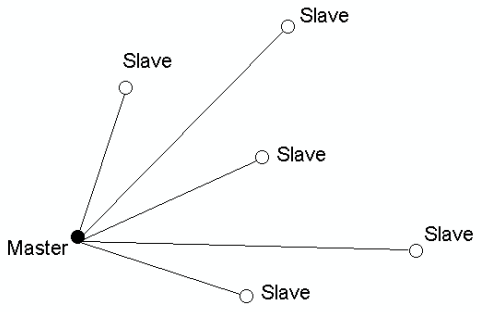



Рис. 2.2-1

Нам понадобится различать линейные и угловые компоненты вектора узловых перемещений $\boldsymbol{Z}$. Первые будем обозначать через $\boldsymbol{u}$, вторые — через $\boldsymbol{\theta}$.

При полном связывании все перемещения ведомых узлов выражаются через перемещения ведущего узла на основании теорем кинематики абсолютно твердого тела:

$$\begin{pmatrix} \boldsymbol{u}_S \\ \boldsymbol{\theta}_S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{u}_M + \boldsymbol{\theta}_M \times \boldsymbol{\rho}_{M-S} \\ \boldsymbol{\theta}_M \end{pmatrix}, \tag{2.2.11}$$

где $\boldsymbol{u}, \boldsymbol{\theta}$ – векторы поступательных перемещений и углов поворота узла в глобальной системе координат, причем индексы *M* и *S* означают соответственно master и slave;

$\boldsymbol{\rho}_{M-S}$ – радиус-вектор, соединяющий ведущий узел с ведомым.

При частичном связывании выражение (2.2.11) охватывает только те степени свободы, которые удовлетворяют соотношениям кинематики абсолютно твердого тела. Остальные перемещения и углы поворота каждого из ведомых узлов остаются независимыми и не выражаются через перемещения ведущего узла. Такое связывание можно представить как связывание в два этапа. На первом этапе производится полное связывание перемещений и углов поворота всех ведомых узлов с перемещениями и углами поворота ведущего узла, а затем выполняется отсоединение независимых степеней свободы ведомых узлов.

Поскольку в уравнения (2.2.11) входит угол поворота мастер-узла, то при использовании жестких тел необходимо использовать только те типы расчетных схем, степени свободы которых содержат углы поворота (тип 2, тип 3 и тип 5). Если в других узлах отсутствуют углы поворота из-за выбора соответствующих типов конечных элементов, то рекомендуется наложить недостающие связи.

Для удобства задания вида связывания вводятся коды связывания. Для пространственной расчетной модели коды связывания имеют вид $X, Y, Z, U_X, U_Y, U_Z$.

Каждый из этих параметров принимает значение f или b. Значение b (blocked) означает, что связывание перемещений, отвечающих данной степени свободы (в глобальной системе координат), производится, а значение f (free) – не производится.

Возможны следующие варианты набора узловых перемещений в коде связывания:

- пространственная расчетная модель – коды связывания $X, Y, Z, U_X, U_Y, U_Z$;
- плоская рама – коды связывания $X, Z, U_Y$ (этот тип жесткого тела навязывает перемещения ведомым узлам в плоскости самого жесткого тела, такое абсолютно жесткое тело можно называть *диском*);
- изгибаемая пластина, расположенная в плоскости XOY – коды связывания $Z, U_X, U_Y$. (этот тип жесткого тела, который можно назвать *штамп*, связывает перемещения принадлежащих ему узлов при выходе их из плоскости жесткого тела).

Надо сказать, что, с одной стороны, жесткие тела (да и вообще полисвязи) представляют собой исключительно мощный инструмент формирования расчетных схем, позволяющий пользователю проявлять свою индивидуальную изобретательность в самых нестандартных ситуациях. С другой стороны, это и небезопасный инструмент — даже опытные расчетчики могут попасть в хорошо закамуфлированную и потому трудную для обнаружения ловушку. Одной из таких ловушек является условие линейной независимости. Это означает, что расчетная схема не должна содержать статически неопределимую подсистему, целиком состоящую из абсолютно жестких элементов. В противном случае распределение усилий в системе не единственно.

Рассмотрим несколько характерных примеров использования абсолютно твердых тел. На рис. 2.2-2,*а* показана конструкция мощной плиты, подкрепленной широкими ребрами. Для такой конструкции использование традиционных приемов моделирования с помощью жестких вставок приведет к тому, что изгиб плиты в пролете между подкрепляющими ребрами будет заметно большим, чем в том случае, когда учитывается сокращение пролета плиты за счет ширины ребра.

Использование в модели абсолютно жестких тел (они на рисунке условно ограничены пунктирной линией) позволяет прикрепить стержень с необходимым эксцентриситетом к узлам на срединной поверхности пластины, а также обеспечить неискажаемость сечения в месте соединения с пластиной, что исключает ее изгиб на этом участке. Заметим, что в данном случае уместно использовать пространственное жесткое тело, несмотря на то, что все его узлы лежат в одной плоскости.

Неискажаемость контура поперечного сечения в схемах, составленных из тонкостенных стержней, часто реализуется за счет устройства диафрагм или аналогичных им элементов жесткости. Если такие элементы не нагружены и их напряженное состояние расчетчика не интересует, то диафрагмы можно моделировать абсолютно жесткими телами, не допускающими деформаций в своей плоскости.

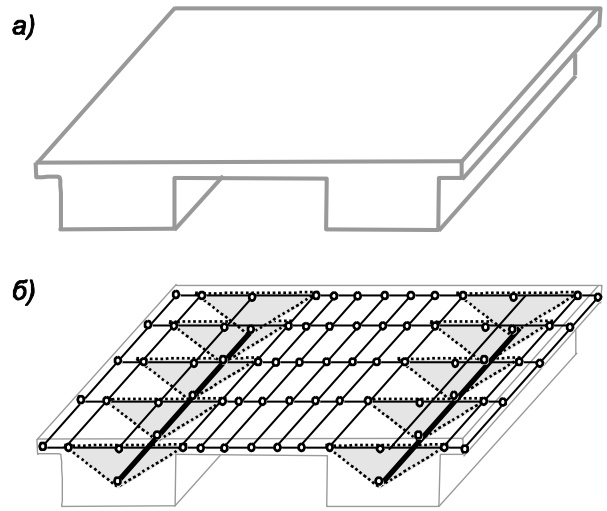



Рис. 2.2-2. Моделирование широкого ребра абсолютно жесткими телами

На рис. 2.2-3 показан пример сопряжения пластин разной толщины с выравниванием одной из поверхностей. Здесь целесообразно использовать абсолютно жесткое тело, содержащее расположенные вдоль линии изменения толщины пары узлов, примыкающие к различным срединным поверхностям пластин.

Заметим, что если просто воспользоваться объединением перемещений верхних и нижних узлов, то не удается правильно описать особенности работы такого сопряжения, поскольку тангенциальное перемещение верхнего узла определяется не только тангенциальным перемещением нижнего узла, но и его углом поворота.

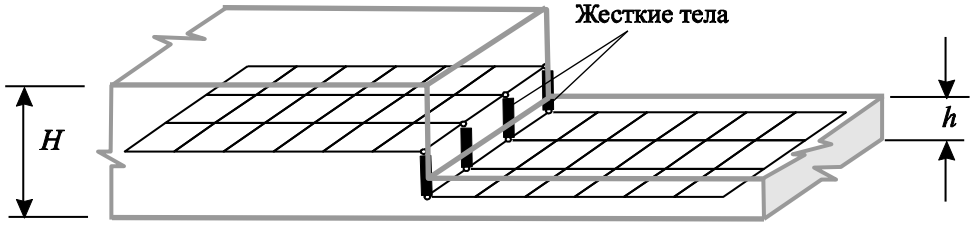



Рис. 2.2-3. Моделирование несоосного скачка толщин

Этот же прием можно применить и в том случае, когда ступень между верхней и нижней пластинами образуется балкой (рис. 2.2-4). Здесь используются трехузловые жесткие тела, к среднему узлу которых прикрепляется стержневой элемент, моделирующий балку.

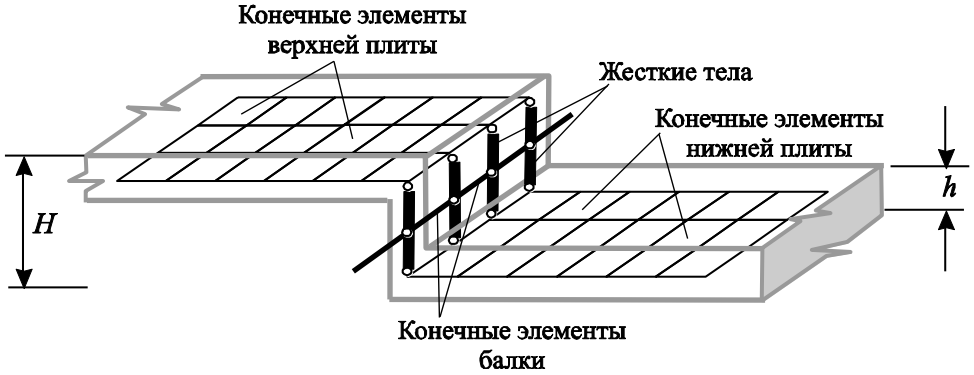



Рис. 2.2-4. Моделирование ступени

Возвращаясь к сопряжению пластин разной толщины с выравниванием одной из поверхностей, следует заметить, что прием использования абсолютно жестких тел предусматривает расположение узлов частей плиты с различной толщиной на разных уровнях, а это не всегда может быть удобным.

Можно все узлы расположить на одном уровне и воспользоваться опцией «смещение срединной плоскости пластин», что тоже приведет к нужному эффекту.

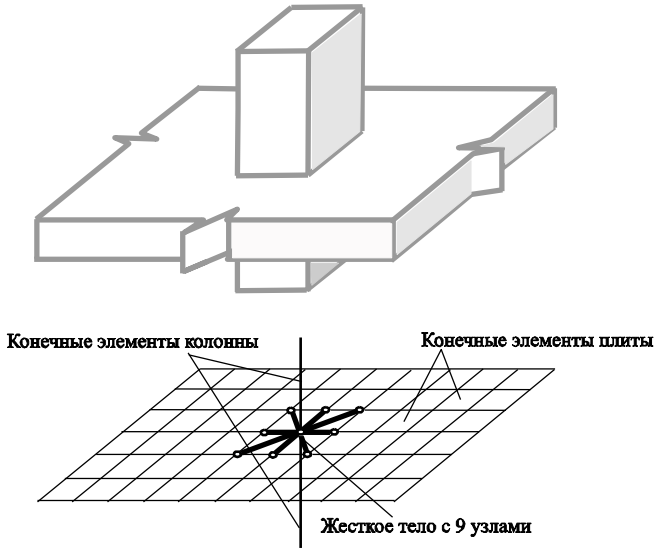



Рис. 2.2-5. Моделирование области сопряжения плиты и колонны

Характерным примером использования абсолютно жестких тел является моделирование области сопряжения монолитных колонны и перекрытия (рис. 2.2-5). Габариты жесткого тела в этом случае соответствуют размерам сечения колонны. Заметим, что в препроцессоре **ФОРУМ** предусмотрен автоматический ввод жестких тел в область сопряжения.

## Депланация тонкостенных стержней

### К определению матрицы жесткости узла

Отличительной особенностью поведения тонкостенных стержней является тот факт, что при их деформировании не выполняется гипотеза плоских сечений. Особенно это проявляется при рассмотрении кручения таких стержней. Простейшей иллюстрацией может служить поведение закрученного двутавра (рис. 2.2-6), где кручение возникло за счет действия пары сил, приложенных к полкам, и эти силы изгибают полки. Если каждая из них при изгибе ведет себя как обычный стержень, то гипотеза плоских сечений выполняется локально (в пределах каждой полки), а не в целом для двутавра.

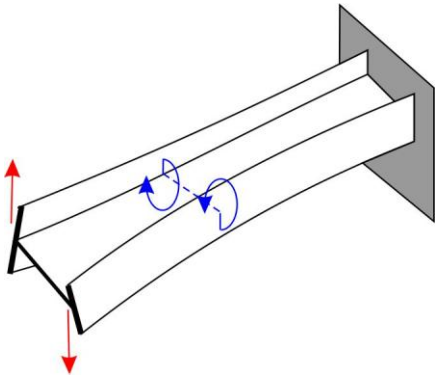


Рис. 2.2-6. *Кручение двутавра*

Изгиб каждой полки определяется действующим в ней моментом, а на сечение двутавра в целом действует пара одинаковых по величине, но различных по знаку моментов, изгибающих полки. Суммарно эта пара статически эквивалентна нулю и образует так называемый бимомент [1]. Кроме того, картина касательных напряжений в рассматриваемом случае стесненного кручения также отличается от обычной.

Нетрудно заметить, что бимомент вызывает в стержне продольные напряжения. Поэтому некоторые нормативные документы требуют выполнять проверку прочности по формуле типа

$$\left( \frac{N}{A_n} \pm \frac{M_y z}{I_y} \pm \frac{M_z y}{I_z} \pm \frac{B\omega}{I_\omega} \right) \Big/ \gamma_c R_y \le 1,$$

то есть с учетом не только продольной силы $N$, моментов $M_y$, $M_z$ , но и с учетом бимомента $B$.

В этой формуле присутствуют новые геометрические характеристики сечения: секториальная площадь $\omega$ и секториальный момент инерции $I_\omega$. Они могут быть определены в программе **ТОНУС**.

В других нормативных документах упомянутые напряжения указаны текстуально. Так, например, раздел (4) пункта 6.2.7 Еврокода-3 говорит:

«Следует учитывать следующие напряжения, возникающие при кручении:

- касательные напряжения $\tau_{t,Ed}$, вызванные крутящим моментом Сен-Венана $T_{t,Ed}$;
- нормальные напряжения $\sigma_{w,Ed}$, вызванные бимоментом $B_{Ed}$, и касательные напряжения $\tau_{w,Ed}$, вызванные стесненным кручением $T_{w,Ed}$».

**Принципиальные положения**

При расчете рамных систем, составленных из элементов, поведение которых согласуется с теорией тонкостенных стержней [1], не удается смоделировать передачу бимоментов в узлах рамы. При расчете «обычных» систем можно ориентироваться на уравнения равновесия сил, действующих на узел со стороны примыкающих к нему элементов. Но бимомент является объектом статически эквивалентным нулю, и уравнивать между собой нули мы не умеем. В простейшем случае соединений двух тонкостенных элементов «по прямой» (как на опоре неразрезной балки), исходя из простейших соображений симметрии, можно говорить о равенстве бимоментов. Но в общем случае нужно признать, что невозможно рассчитать конструкцию, отличную от одиночного тонкостенного стержня или неразрезной балки.

В качестве альтернативы предлагалось конечно-элементное моделирование рассматриваемой конструкции (см. например [2, 3, 4, 5 и др.]), когда стержневую систему рассматривают как составленную из оболочечных конечных элементов, что приводит к большому объему исходной информации и трудоемкости ее подготовки. Кроме того, результаты такого расчета трудно увязать с требованиями норм проектирования, где все проверки относятся к стержневой модели.

Кроме того, попытка выделить в такой расчетной схеме узловое сопряжение тонкостенных элементов, имея в виду привычное представление об узле как о точечном объекте, оказывается безуспешной. В общем случае в реальной конструкции узла не удается указать отвечающий теории тонкостенных стержней центр узла, т.е. точку, в которой пересекаются оси, проходящие через центры изгиба поперечных сечений стержней, образующих узел.

Успешной оказалась идея, предложенная в пионерской работе Шмидта [6], где предлагалось использовать плоские конечные элементы только в зоне конструкции узла, а вне конструкции узла – тонкостенные стержневые конечные элементы. По своей сути автор использовал некоторый аналог суперэлементного моделирования, когда из рассмотрения изымаются «внутренние» неизвестные, а система разрешающих уравнений оперирует только трансляционными (стыковочными) степенями свободы. Матрица жесткости такого элемента может быть определена путем расчета на принудительную депланацию сечения на стыке с примыкающими стержнями.

Идея использования пространственного узлового суперэлемента развивалась в трудах [7, 8, 9, 10, 11]. Понятие суперэлемента узла позволяет учесть взаимодействие между внутренними усилиями и деформацией узла и торцевыми сечениями примыкающих к нему тонкостенных стержней.

В рамках такого подхода Макфедран и Гродин [12] предложили модель, в которой традиционные шесть степеней свободы напрямую связаны с перемещениями и поворотами «точечного узла», а через конечно-элементную модель суперэлемента передаются депланации и взаимодействуют бимоменты торцевых сечений примыкающих тонкостенных стержней.

**Моделирование воздействия депланации**

Внешними узлами рассматриваемого суперэлемента являются узлы, к которым примыкают торцевые сечения тонкостенного стержня. Эти узлы передают бимоменты, а их перемещения должны допускать деформацию депланационного типа, возникающую в примыкающем торце тонкостенного стержня.

Матрица жесткости узлового суперэлемента относительно депланаций имеет структуру, представленную схематически в соотношении (2.2.12).

$$\begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \cdots \\ B_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1m} \\ d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ d_{m1} & d_{m2} & \cdots & d_{mm} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ \cdots \\ D_m \end{bmatrix}. \qquad (2.2.12)$$

Элементы $d_{jk}$ $\left(j,k=1,2,...,m\right)$ этой матрицы рассчитываются по общей процедуре единичных принудительных перемещений. Рассматривается последовательность нагружений, в каждом из которых одному из торцевых сечений задается единичная депланация $D_i$=1 и определяются реактивные бимоменты $d_{jk}$.

Из теории тонкостенных стержней [1, стр. 25] следует, что вследствие депланации сечения продольные перемещения $u$ по направлению оси стержня изменяются согласно закону секториальных площадей

$$u(s) = -\frac{d\theta}{dx}\omega(s), \qquad (2.2.13)$$

где θ - угол закручивания, ω - секториальная площадь.

Если депланация $D = d\theta/dx$ равна единице ($D$=1/м), то перемещения контура поперечного сечения численно совпадают со взятой с обратным знаком эпюрой секториальных площадей. Следовательно, при единичной депланации требуется задать перемещения $u$ численно равными значениям –ω.

Польская школа расчетов ориентируется на задание депланационного воздействия, как, например, описано в работе [9], путем установки бесконечно жестких тел, присоединенных к узлам, соответствующих каждой пластине, из которых состоит тонкостенный стержень (рис. 2.2-7).

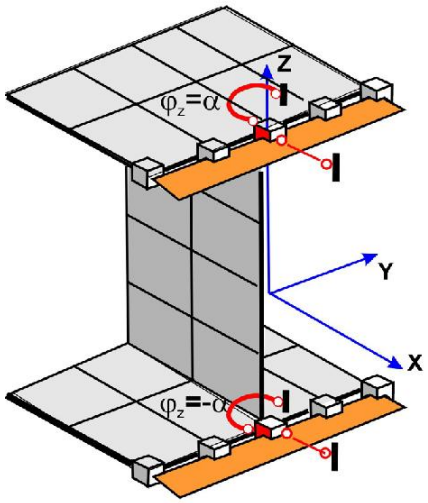



Рис. 2.2-7. *Использование бесконечно жесткого тела*

Эти тела соединяют один независимый узел («ведущий») с переменным числом зависимых узлов («ведомых»). Поскольку жесткое тело в пределах каждой пластинки должно обеспечивать прямолинейность деформируемой кромки, то в таком жестком теле связываются только перемещения по направлению продольной оси тонкостенного стержня. Чтобы смоделировать

единичную депланацию, требуется ведущим узлам жестких тел задать смещения и повороты, как это показано на рис. 2.2-8.

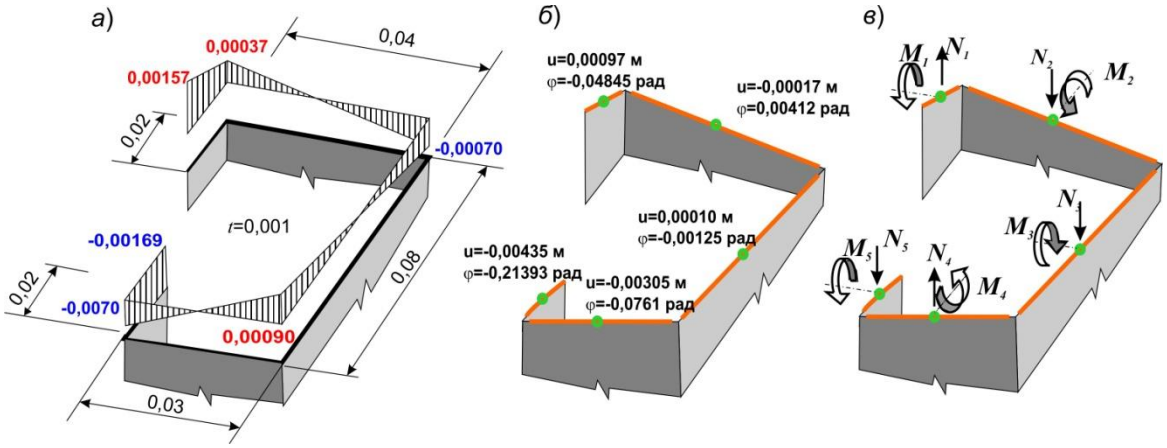



Рис. 2.2-8. *Имитация единичной депланации: а - эпюра секториальных площадей, б - соответствующие ей заданные перемещения ведущих узлов , в – реакции в связях*

А для того, чтобы возникла возможность задания таких кинематических воздействий, в ведущих узлах жестких тел следует предусмотреть соответствующие связи, а именно:

- связь, препятствующая смещению вдоль оси примыкающего стержня (нормальное направление по отношению к плоскости торцевого сечения;
- связь, препятствующая углу поворота жесткого тела вокруг оси перпендикулярной плоскости соответствующей пластинки.

Заметим, что введенные жесткие тела должны обеспечивать смещение торцевого сечения только «своей» пластинки, поэтому различные жесткие тела не должны иметь общих узлов. В связи с этим соответствующие изменения следует внести в конечно-элементное разбиение, используя, например, такой инструмент **SCAD**, как отделение элемента от узла.

Более удобно моделировать депланацию линейными смещениями узлов торцевого сечения. Такой подход решает проблему узла, принадлежащего различным бесконечно жестким телам. Кроме того, не требуется вычислять требуемый угол поворота и смещение ведущего узла.

Если в рассматриваемом стыке конечно-элементная модель суперэлемента имеет $m$ узлов, то им необходимо придавать смещения $-\omega_i$ ($i$=1,…, $m$) по направлению оси примыкающего стержня. Естественно, что на эти узлы следует наложить соответствующие связи (рис. 2.2-9).

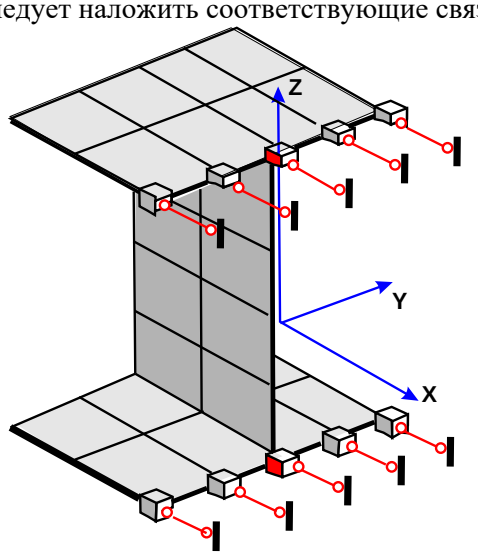



Рис. 2.2-9. *Использование узловых смещений*

Вместо наложения подлежащих смещениям связей можно присоединить к торцевым узлам простейшие нуль-элементы (рис. 2.2-10). Тогда дислокационная нагрузка ω заменится силовой [13], если к свободным узлам нуль-элементов приложить силы $P_i = \omega_i(EA/\mathbf{L})$.

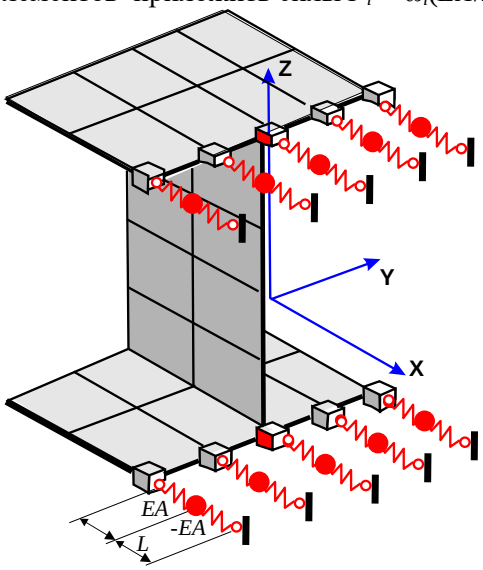



Рис. 2.2-10. *Моделирование нуль-элементами*

Известное определение бимомента

$$B = \int_F \sigma_z \omega \cdot dF\,, \tag{2.2.14}$$

в котором суммирование идет по площади рассматриваемого торцевого сечения, в случае используемой здесь дискретной модели будет иметь вид

$$B = \sum_{i=1}^{m} R_i \omega_i\,. \tag{2.2.15}$$

Здесь через $R_i$ обозначены реакции в наложенных связях (усилия в нуль-элементах) соответствующего торцевого сечения, которые вызваны воздействием смещения, с помощью которых моделировалась депланация, приложенная к узлу.

**Иллюстративный пример**

Рассматривается узел сопряжения ригеля и колонны в верхнем углу одноэтажной рамы (рис. 2.2-11.*а*). Конечно-элементная модель узла представлена на рис. 2.2-11.*б*.

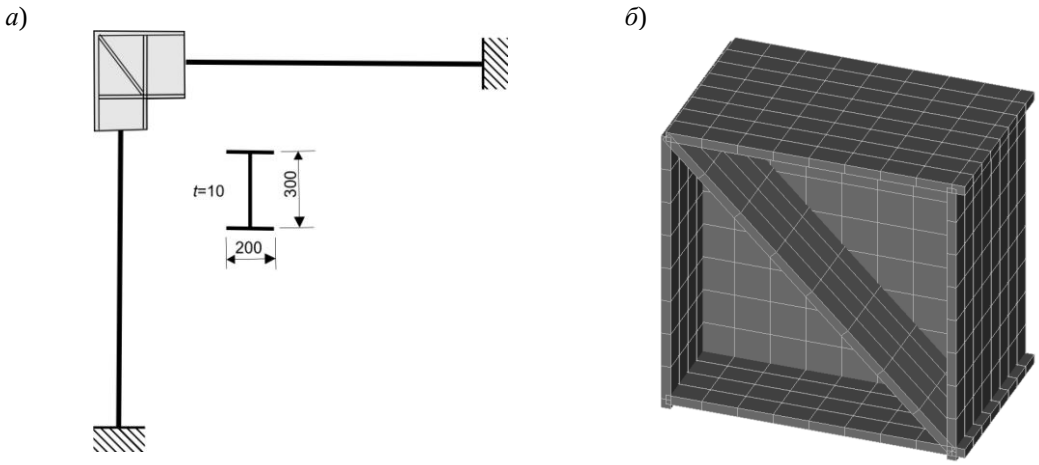
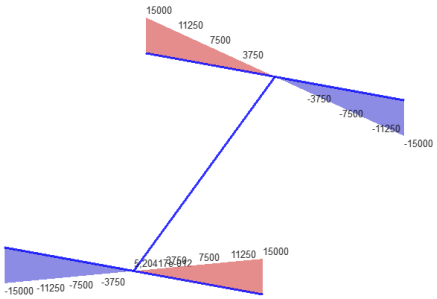



Рис. 2.2-11. *К иллюстративному примеру*

Эпюра секториальных площадей, вычисленная в программе ТОНУС, показана на рис. 2.2-12.*а*, соответствующее ей нагружение DX единичной дислокацией торца ригеля — на рис. 2.2-12.*б*. Второе нагружение DZ, соответствующее единичной дислокации торца колонны, вполне аналогично, с той лишь разницей, что действует на другие узлы и направлено не вдоль оси X, а вдоль Z.

При создании нагружения учтено, что секториальные площади были вычислены в миллиметрах, а в загружении перемещения нужно задать в метрах. Например, секториальная площадь ω=15000 мм$^2$=0, 015 м$^2$, соответствующее смещение равно 15 мм (эта величина показана на рисунке).

*а*) *б*)



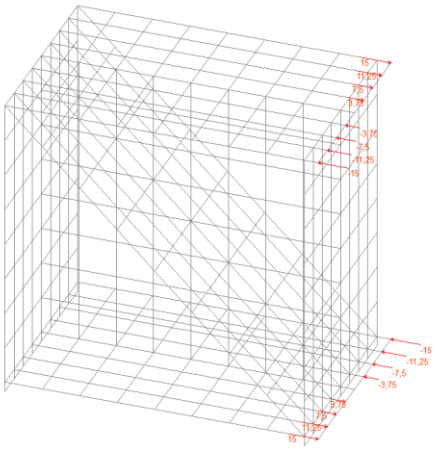
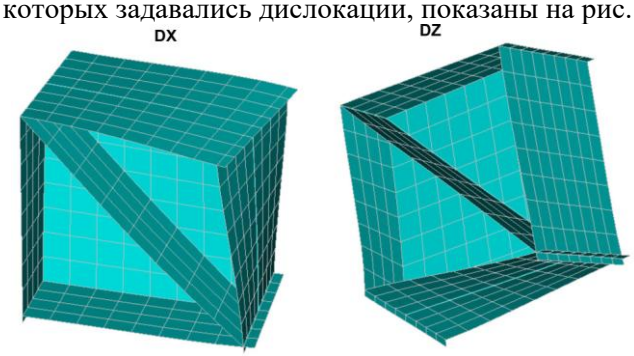



Рис. 2.2-12. *Моделирование депланационного воздействия DX*

Расчет на эти нагружения, выполненный в программе **SCAD**, определил деформированное состояние узлового суперэлемента таким, как показано на рис. 2.2-13. Реакции в связях, с помощью которых задавались дислокации, показаны на рис. 2.2-14 для нагружения DX.



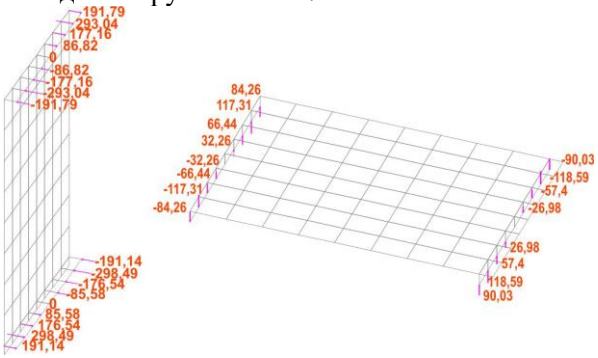




Рис. 2.2-13. *Деформированное состояние*

Рис. 2.2-14. *Реакции в связях от DX*

Вычисление бимоментов по формуле (2.2.15) представлено в следующих таблицах

| Нагружение DX | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Rx | Rz | ω | Rx*ω | Rz*ω |
| 191,786 | 84,262 | 0,015 | 2,87679 | 1,26393 |
| 293,036 | 117,311 | 0,01125 | 3,296655 | 1,319749 |
| 177,156 | 66,435 | 0,0075 | 1,32867 | 0,498263 |
| 86,821 | 32,263 | 0,00375 | 0,325579 | 0,120986 |
| -86,821 | -32,263 | -0,00375 | 0,325579 | 0,120986 |
| -177,156 | -66,435 | -0,0075 | 1,32867 | 0,498263 |
| -293,036 | -117,311 | -0,01125 | 3,296655 | 1,319749 |

| Нагружение DZ | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Rx | Rz | ω | Rx*ω | Rz*ω |
| 82,334 | 201,55 | 0,015 | 1,23501 | 3,02325 |
| 122,53 | 298,562 | 0,01125 | 1,378463 | 3,358823 |
| 62,077 | 173,722 | 0,0075 | 0,465578 | 1,302915 |
| 28,665 | 85,046 | 0,00375 | 0,107494 | 0,318923 |
| -28,665 | -85,046 | -0,00375 | 0,107494 | 0,318923 |
| -62,077 | -173,722 | -0,0075 | 0,465578 | 1,302915 |
| -122,53 | -298,562 | -0,01125 | 1,378463 | 3,358823 |

| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| -191,786 | -84,262 | -0,015 | 2,87679 | 1,26393 | | -82,334 | -201,55 | -0,015 | 1,23501 | 3,02325 |
| -191,142 | -90,035 | -0,015 | 2,86713 | 1,350525 | | -84,315 | -198,765 | -0,015 | 1,264725 | 2,981475 |
| -298,49 | -118,585 | -0,01125 | 3,358013 | 1,334081 | | -118,994 | -294,874 | -0,01125 | 1,338683 | 3,317333 |
| -176,545 | -57,401 | -0,0075 | 1,324088 | 0,430508 | | -67,666 | -177,643 | -0,0075 | 0,507495 | 1,332323 |
| -85,582 | -26,98 | -0,00375 | 0,320933 | 0,101175 | | -32,471 | -87,884 | -0,00375 | 0,121766 | 0,329565 |
| 85,582 | 26,98 | 0,00375 | 0,320933 | 0,101175 | | 32,471 | 87,884 | 0,00375 | 0,121766 | 0,329565 |
| 176,545 | 57,401 | 0,0075 | 1,324088 | 0,430508 | | 67,666 | 177,643 | 0,0075 | 0,507495 | 1,332323 |
| 298,49 | 118,585 | 0,01125 | 3,358013 | 1,334081 | | 118,994 | 294,874 | 0,01125 | 1,338683 | 3,317333 |
| 191,142 | 90,035 | 0,015 | 2,86713 | 1,350525 | | 84,315 | 198,765 | 0,015 | 1,264725 | 2,981475 |
| | | | 31,39571 | 12,83843 | | | | | 12,83843 | 31,92921 |

Таким образом, матрица жесткости узлового суперэлемента имеет вид:

| | DX | DZ |
|---|---|---|
| BX= | 31,39571 | 12,83843 |
| BZ= | 12,83843 | 31,92921 |

**Упрощенные варианты расчета**

В некоторых случаях вместо задания матрицы жесткости узлового суперэлемента можно указать на один из идеализированных вариантов работы узлового соединения:

- бесконечно жесткий узел (депланации торцов всех сходящихся в этом узле элементов равны нулю);
- абсолютно податливый узел (бимоменты на торцах всех сходящихся в этом узле элементов отсутствуют);
- узел, уравнивающий депланации торцов всех сходящихся в этом узле элементов.

Первый вариант, как правило, завышает значения бимоментов и в этом смысле дает решение в запас надежности.

Второму варианту соответствует свободный конец консоли.

Третий вариант точно реализуется, например, в неразрезной балке, но может быть использован как некоторое приближенное решение и в других случаях (например, при переходе пояса через узел фермы, где, как правило, решетка почти не участвует в передаче депланаций).

**Ориентация матрицы узла**

При подготовке матрицы жесткости задание нагружений единичной депланацией стыков следовало вполне определенному порядку. Тем самым неявно устанавливалась определенная нумерация стыков, и в матрице жесткости этой нумерации должны соответствовать номера строк и столбцов. На рис. 2.2-15 эта нумерация показана в явном виде. Кроме того, на этом рисунке показано, как одна и та же конструкция узла может различным способом располагаться в пространстве.

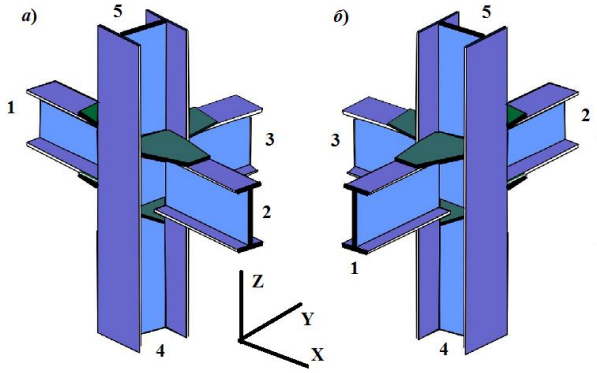



Рис. 2.2-15. *К заданию положения узла в пространстве*

Чтобы различать случаи типа *а*) и *б*), где матрица жесткости узла одна и та же, используется матрица, строки которой следуют нумерации стыков и содержат трехмерные векторы величин, пропорциональных направляющим косинусам. Для случая, показанного на рис. 2.2-15, эти матрицы будут такими:

| Случай «*а*» | | | |
|---|---|---|---|
| Стык | X | Y | Z |
| 1 | -1 | 0 | 0 |
| 2 | 1 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 1 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | -1 |
| 5 | 0 | 0 | 1 |

| Случай «*б*» | | | |
|---|---|---|---|
| Стык | X | Y | Z |
| 1 | 0 | -1 | 0 |
| 2 | 0 | 1 | 0 |
| 3 | -1 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | -1 |
| 5 | 0 | 0 | 1 |

## Литература к разделу Депланация тонкостенных стержней


1. Власов В.З. Тонкостенные упругие стержни — М.: Физматгиз, 1959 — 568 с.
2. Панасенко Н.Н., Юшков В.П., Синельников А.В. Конечно-элементная модель пространственных конструкций из тонкостенных стержней корытого профиля. В 2-х частях. Часть 1. // Вестник АГТУ. Сер. Морская техника и технология. 2015. №2. С. 89-100.
3. Barsoum R., Gallagher R. Finite element analysis of torsional and lateral stability problems. Int. J. Num. Meth. Eng., Volume 2, Issue 3, 1970, Pages 335-352.
4. Qi, H., Wang, Z., Zhang, Z. An efficient finite element for restrained torsion of thin-walled beams including the effect of warping and shear deformation. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2019. 233(3). Pp. 032029. DOI: 10.1088/1755-1315/23- 3/3/032029
5. Rajasekaran S. Finite element analysis of thin-walled for open cross sections. Structural Engineering Report, №34, September 1971, Pages 144-160.
6. Szmidt J. K. Analysis of frames made of thin-walled members // Engng. Trans., 23, 1975, —P. 447-472.
7. Piechnik S. CAD in practical cases of designing thin-walled structures. Arch. Civil Engng., 46, 2000.
8. Piechnik S. Thin-walled beam subjected to “warping constraints”. J. Theor. Appl. Mech., 38, 2000.
9. Szymczak C., Kreja I., Mikulski T., Kujawa M. Sensitivity analisys of beams and frames made of thin-walled members — Gdańsk: Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, 2003.
10. Chavan K.S. Wriggers P. Consistent coupling of beam and shell models for thermo-elastic analysis / K. S. Chavan, // International journal for numerical methods in engineering, 2004. – Vol.59, №14. – P. 1861–1876.
11. Yu Y., Chan T.H.T., Sun Z.H., Ling Z.H. Mixed-dimensional consistent coupling by multi-point constraint equations for efficient multiscale modeling // Advances in structural engineering, 2012. – Vol. 15(5). – P. 837–854.
12. MacPhedran I., Grodin G.Y.G. Frame Stability Considering Member Interaction and Compatibility of Warping Deformations — Edmonton: University of Alberta, Department of Civil & Environmental Engineering, 2009.
13. Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. 4-е изд. — М.: Издательство СКАД СОФТ, 2017.— 736 с.


## Динамическая задача

Если нагрузки на систему меняются во времени, т. е. $\boldsymbol{f} = \boldsymbol{f}(t)$, то следует полагать функциями времени также усилия и перемещения, что может потребовать введения в рассмотрение скоростей $d\boldsymbol{Z}/dt$ и ускорений $d^2\boldsymbol{Z}/dt^2$. Когда возникающие при этом силы инерции $\boldsymbol{J}(t) = \boldsymbol{M}\, d^2\boldsymbol{Z}/dt^2$ не могут считаться пренебрежимо малыми по сравнению с нагрузками на систему и силами упругости, их следует учесть при формировании условий равновесия, которые примут вид дифференциальных уравнений

$$\boldsymbol{M}\frac{d^2\boldsymbol{Z}}{dt^2} + \boldsymbol{K}\boldsymbol{Z}(t) = \boldsymbol{f}(t)\cdot \qquad (2.2.16)$$

Матрица масс системы определяется как сумма матриц масс ее элементов с добавлением масс, связанных с инерционными свойствами частей сооружения, не вошедшими в расчетную схему.

В программе **SCAD** матрица масс элемента может представлять собой согласованную матрицу или матрицу сосредоточенных масс:

- **согласованная матрица масс** элемента вычисляется с использованием функций формы элемента и позволяет корректно учесть моменты инерции масс. Эти функции формы такие же, как и те, что используются при вычислении матрицы жесткости, отсюда и следует название «согласованная».
- в **матрице сосредоточенных масс** масса каждого элемента распределена по его узлам. Другими словами, сосредоточенные массы, размещенные в узлах элемента, в совокупности представляют массу элемента.

Поэтому матрица сосредоточенных масс является диагональной, все элементы которой, кроме диагональных, равны нулю. Такой подход является приближенным, но при достаточно густой сетке элементов он дает хорошие результаты.

Задача определения характеристик собственных колебаний системы (F анализ) заключается в нахождении условий, при которых ненагруженная система совершает гармонические колебания по закону

$$\boldsymbol{Z}(t) = \boldsymbol{\Psi}\sin(\omega t + \varphi). \qquad (2.2.17)$$

В выражении (2.2.17) вектор $\boldsymbol{\Psi}$ характеризует форму собственных колебаний (соотношения между смещениями узлов); $\omega$ — их частоту; $\varphi$ — начальную фазу. Подстановка (2.2.17) в (2.2.16) с учетом того, что $\boldsymbol{f}(t) = 0$ дает уравнение для собственных колебаний

$$(\boldsymbol{K} - \omega^2\boldsymbol{M})\ \boldsymbol{\Psi} = 0, \qquad (2.2.18)$$

нетривиальное решение которого существует лишь тогда, когда величины $\omega_i\,(i = 1,...,n)$, называемые собственными частотами, обращают в нуль детерминант матрицы $[\boldsymbol{K}–\omega^2\boldsymbol{M}]$. Соответствующие им формы собственных колебаний $\boldsymbol{\Psi}_i$ вычисляются лишь с точностью до произвольного множителя. Этот множитель может быть назначен, например, таким образом, что максимальная компонента вектора $\boldsymbol{\Psi}_i$ равна единице. Следует также отметить свойство ортогональности собственных векторов как относительно матрицы масс, так и относительно матрицы жесткости, т. е.

$$\boldsymbol{\Psi}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{M}\boldsymbol{\Psi}_j = 0 \quad \text{и} \quad \boldsymbol{\Psi}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{K}\boldsymbol{\Psi}_j = 0 \quad \text{при } i \neq j. \qquad (2.2.19)$$

При динамическом расчете число компонент вектора $\boldsymbol{Z}$, с которыми связаны инерционные силы (количество *динамических степеней свободы*), зачастую бывает намного меньшим, чем при статическом расчете. Типичным примером могут служить повороты узлов, обычно оказывающие значительно меньшее динамическое влияние, чем их линейные смещения. В **SCAD** инерционные моменты, соответствующие поворотам узлов, и другие инерционные характеристики могут быть проигнорированы, однако это уже задает сам пользователь, формулируя задачу динамического расчета. Если часть инерционных составляющих нагрузки не учитывается, то, разделяя вектор $\Psi$ на подвектор $\Psi_0$, для которого силы инерции равны нулю, и подвектор $\Psi_1$, связанный с инерционными силами, можно записать систему (2.2.18) в виде

$$\boldsymbol{K}_{00}\ \boldsymbol{\Psi}_0 + \boldsymbol{K}_{01}\ \boldsymbol{\Psi}_1 = \boldsymbol{0};$$

$$\boldsymbol{K}_{10}\ \boldsymbol{\Psi}_0 + \boldsymbol{K}_{11}\ \boldsymbol{\Psi}_1 = \omega^2\boldsymbol{M}_1\boldsymbol{\Psi}_1. \qquad (2.2.20)$$

Из этой системы исключается подвектор $\boldsymbol{\Psi}_0$, и в результате указанной процедуры «статического уплотнения» размерность задачи модального анализа резко уменьшается и приобретает вид

$$\left[\left(\boldsymbol{K}_{11} - \boldsymbol{K}_{10}\boldsymbol{K}_{00}^{-1}\boldsymbol{K}_{01}\right)^{-1}\boldsymbol{M}_1 - \lambda^2\boldsymbol{I}\right]\boldsymbol{\psi}_1 = 0\,, \qquad (2.2.21)$$

где $\boldsymbol{I}$ – единичная матрица, а $\lambda = 1/\omega$.

В качестве результатов модального анализа выдаются собственные числа $\lambda_i$ и собственные векторы $\boldsymbol{\Psi}_1$ задачи (2.2.21). С ними связаны круговая частота $\omega = 1/\lambda$ (рад/с), циклическая частота $\theta = \omega/2\pi$ (Гц) и период $T = 1/\theta$.

В силу ортогональности форм собственных колебаний решение любой динамической задачи в виде разложения

$$\boldsymbol{Z}(\mathrm{t}) = \sum_i y_i(\mathrm{t})\ \boldsymbol{\Psi}_\mathrm{i} \tag{2.2.22}$$

ведет к распаду системы дифференциальных уравнений (2.2.16) на независимые относительно обобщенных координат $y_i(t)$. Эти уравнения с учетом вводимого в них дополнительного члена, пропорционального скорости (с его помощью учитывается сопротивление движению), имеют вид

$$\frac{d^2 y_i}{dt^2} + 2\xi_\mathrm{i}\,\omega_\mathrm{i}\,\frac{dy_i}{dt} + \omega_\mathrm{i}^2 y_i = P_\mathrm{i}(\mathrm{t})/M_\mathrm{i}. \tag{2.2.23}$$

Обобщенные силы

$$P_\mathrm{i}(\mathrm{t}) = \boldsymbol{\Psi}^T_i \boldsymbol{f}(\mathrm{t}); \tag{2.2.24}$$

массы

$$M_i = \Psi_i^T M \Psi_i \tag{2.2.25}$$

и параметры затухания $\xi_i$ совместно с начальными условиями $y^0{}_i$ и $y'_i$, получаемыми из $\boldsymbol{Z}^0 = \boldsymbol{Z}(0)$ и $\boldsymbol{Z}' = d\boldsymbol{Z}(0)/dt$ по формулам:

$$y_\mathrm{i}^0 = \boldsymbol{\Psi}_i^T \boldsymbol{M}\boldsymbol{Z}^0;\ \ y_i' = \boldsymbol{\Psi}_i^T \boldsymbol{M}\boldsymbol{Z}' \tag{2.2.26}$$

полностью определяют решение задачи. Это решение дается выражением

$$y_i = \mathrm{e}^{-\xi_i\omega_i t}\left(\frac{y_i^0\xi_i\omega_i + y_i^1}{\omega_{Di}}\sin\omega_{Di} + y_i^0\cos\omega_{Di}\right) + \frac{1}{\omega_{Di}M_i}\int_0^t P_i(\tau)e^{-\xi_i\omega_i(t-\tau)}\sin\omega_{Di}(t-\tau)d\tau, \tag{2.2.27}$$

в котором первое слагаемое учитывает начальные условия, а второе — носит название интеграла Дюамеля.

Входящая в выражение (2.2.27) частота демпфированных колебаний

$$\omega_{Di} = \omega_i(1-\xi_I^2)^{1/2} \tag{2.2.28}$$

мало отличается от $\omega_i$ при обычных значениях *логарифмического декремента*

$$\delta = 2\pi\xi\omega / \omega_D \approx 2\pi\xi. \tag{2.2.29}$$

В большинстве случаев используется общее для всей системы (а не поэлементное) значение логарифмического декремента, что соответствует конструкциям, выполненным из одинакового материала и примерно с одинаковыми решениями узлов соединения. Исключением являются расчетные модели с большим и/или неоднородным демпфированием, например, такие, которые включают в себя подсистему грунтового основания. Этот случай учитывается лишь в варианте прямого интегрирования уравнений движения.

## Об учете демпфирования

В литературе, посвященной динамическим расчетам, различные авторы используют различные модели демпфирования, это нашло применение в разных нормативных документах, где используются различные формы представления внутренних потерь, в частности:

- коэффициент поглощения энергии (коэффициент диссипации) — $\psi$;
- параметр затухания в долях от критического — $\xi$;
- логарифмический декремент колебаний — $\delta$;
- коэффициент потерь (комплексное внутреннее трение) — $\zeta$;
- коэффициент внутреннего трения (неупругого сопротивления) — $\gamma$.

Между этими параметрами существуют следующие соотношения (см. раздел 3 справочника [4]):

$$\psi = 2\delta;\quad \gamma = \delta/\pi;\quad \xi \approx \delta/(2\pi);\quad \delta = \pi\eta/\sqrt{1-\gamma^2/4}.$$

Необходимые значения этих параметров для конструкций различного типа можно получить в программе **КУСТ**, входящей в систему SCAD Office.

С учетом демпфирования уравнение динамического равновесия (2.2.16) приобретет вид

$$\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{Z}} + \boldsymbol{C}\dot{\boldsymbol{Z}} + \boldsymbol{K}\boldsymbol{Z}(t) = \boldsymbol{f}(t) \cdot \tag{2.2.30}$$

Для матрицы демпфирования $\boldsymbol{C}$ в общем случае уже не выполняются условия ортогональности типа (2.2.19), и распад системы дифференциальных уравнений (2.2.30) на независимые относительно обобщенных координат $y_i(t)$ становится невозможным. Однако такое становится возможным при использовании гипотезы Рэлея о пропорциональном демпфировании

$$\boldsymbol{C} = \alpha \cdot \boldsymbol{M} + \beta \cdot \boldsymbol{K}. \tag{2.2.31}$$

Здесь $\alpha$, $\beta$ – коэффициенты пропорциональности, причем слагаемое $\alpha\boldsymbol{M}$ отвечает за демпфирование по нижним модам, а $\beta\boldsymbol{K}$ – по верхним.

Из разложения вектора перемещений по формам собственных колебаний следует:

$$\alpha + \beta\omega_i^2 = 2\xi_i\omega_i, \quad i = 1, 2, \ldots, N_{\mathrm{mod}\,es}. \tag{2.2.32}$$

Для нахождения неизвестных $\alpha$, $\beta$ воспользуемся уравнением (2.2.32) при $i$ = 1, 2:

$$\alpha = \frac{2\omega_1\omega_2\left(\xi_1\omega_2 - \xi_2\omega_1\right)}{\omega_2^2 - \omega_1^2}, \quad \beta = \frac{2\left(\xi_2\omega_2 - \xi_1\omega_1\right)}{\omega_2^2 - \omega_1^2}, \tag{2.2.33}$$

где $\omega_1, \omega_2$, – первые две собственные циклические частоты [рад/с]; $\xi_1, \xi_2$ – модальное демпфирование для первой и второй форм собственных колебаний, заданное в процентах от критического демпфирования.

Предполагается, что $\omega_2 > \omega_1 > 0$ и $\xi_2 \geq \xi_1 > 0$. В случае, когда $\omega_2 = \omega_1$ или первые две частоты очень близки ($\left(\omega_2 - \omega_1\right)/\omega_1 < 0.0001$), принимается, что $\alpha = 2\xi_1\omega_1$, а $\beta = 0$.

Параметр α отвечает за затухание по низким модам, а β – по высоким. Важно учитывать и тот, и другой параметры. Часто принимается упрощение β = 0. При этом демпфирование по верхним модам оказывается существенно заниженным, поэтому динамическая реакция системы может быть существенно завышена (до 2-х раз и более).

Модели демпфирования, реализованные в методе разложения по формам собственных колебаний и при прямом интегрировании с использованием гипотезы Рэлея, вообще говоря, разные. Это видно, например, из неоднозначности нахождения параметров α, β из (2.2.33), поскольку, задавая разные значения пар индекса $i$, будем получать разные значения α, β. Однако для большинства практических задач метод разложения по формам собственных колебаний и методы прямого интегрирования дают близкие результаты, если и тот и другой применены корректно.

## 2.3. Решение систем уравнений

После того как заданная конструкция представлена в виде конечно-элементной структуры, задача об определении перемещений узлов сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений вида

$$\boldsymbol{KZ} = \boldsymbol{F}, \tag{2.3.1}$$

где $\boldsymbol{K}$ — симметричная матрица размером $N \times N$. Отметим, что матрица $\boldsymbol{K}$, как правило, содержит значительное число нулевых элементов (разреженная матрица) и положительно определена;

$\boldsymbol{F}$ — матрица правых частей (загружений) размером $N \times k$ ($k$ — количество загружений);

$\boldsymbol{Z}$ — искомая матрица перемещений размером $k \times N$.

Среди методов решения систем линейных алгебраических уравнений используются как прямые методы, так и итерационные. Прямые методы являются мощным средством решения систем линейных алгебраических уравнений с разреженными матрицами, если удается найти эффективный способ упорядочения, существенно уменьшающий заполнение при факторизации матрицы. Достоинство этих методов состоит в том, что они менее чувствительны к плохой обусловленности системы уравнений, позволяют выявить ошибки моделирования, приводящие к геометрической изменяемости расчетной модели, и продолжительность решения почти не зависит от количества правых частей, если последних относительно мало.

Итерационные методы решения систем линейных алгебраических уравнений широко применяются при исследовании больших задач механики деформируемого твердого тела. В частности, они оказываются весьма эффективными в тех случаях, когда в структуре уровней графа смежности появляется большое количество заполнений и, как следствие, прямые методы начинают работать очень медленно. Итерационные методы обычно применяются тогда, когда матрица системы уравнений является положительно определенной.

Среди наиболее распространенных прямых методов в МКЭ программах обычно используются профильный метод, основанный на Гауссовом исключении, и фронтальный метод. В первом случае матрица разрешающих уравнений формируется до их решения полностью (см. рис. 2.3-1), во втором — в оперативной памяти формируются группы уравнений, обычно включающие неизвестные одного узла. Матрица жесткости системы в явном виде не собирается, а вместо этого последовательно добавляются матрицы жесткости элементов, степени свободы которых входят в данную группу. Как только очередной фронт становится собранным, то есть все примыкающие к нему элементы включены в ансамбль, производится Гауссово исключение неизвестных, номера которых не совпадают с номерами уравнений фронта. В результате Гауссово исключение производится в плотной (фронтальной) матрице относительно небольшой размерности, состоящей из полностью собранной части уравнений и не полностью собранной. В процессе решения задачи фронт движется по узлам МКЭ модели. Эффективность мультифронтального метода в большинстве случаев превосходит модифицированный алгоритм Гаусса на порядок.

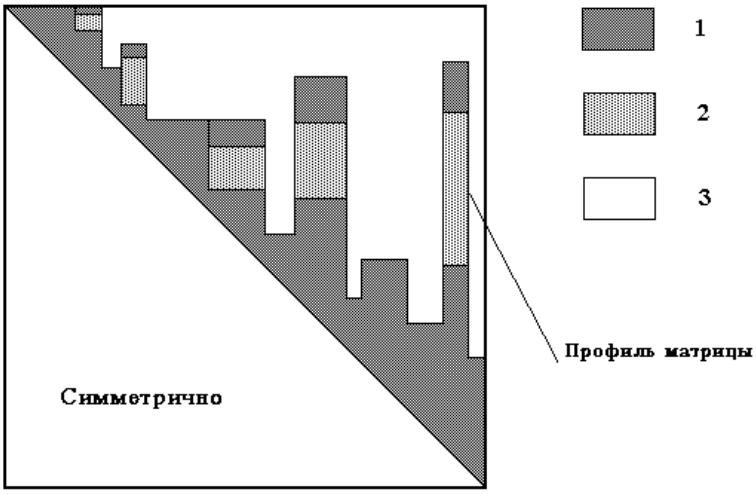



Рис. 2.3-1. *Профиль матрицы. 1 — ненулевые элементы, 2 — нулевые элементы, заполняемые при разложении матрицы, 3 — нулевые элементы, не заполняемые при разложении матрицы*

Упорядочение очередности исключения уравнений (профильный метод) и очередности подачи конечных элементов на сборку (фронтальный метод), направленное на уменьшение заполнений, производится, как правило, с учетом структуры заполнения матрицы жесткости. Здесь и далее под заполнением понимаются ненулевые элементы, появляющиеся в матрице в процессе факторизации на месте нулевого элемента исходной матрицы (см. рис. 2.3-1). Количество заполнений существенно влияет на эффективность обоих методов решения системы линейных алгебраических уравнений.

В комплексе **SCAD** реализовано несколько методов перенумерации. Например: обратный алгоритм Катхилла-Макки, метод фактор-деревьев, метод вложенных сечений, алгоритм параллельных сечений, алгоритм METIS, Слоана, минимальной степени и другие. Эти методы и их сравнительные характеристики описаны в специальной литературе. Пользователю предоставлена возможность выбора метода перенумерации, поскольку эффективность того или иного алгоритма значительно зависит от структуры конкретной матрицы ***K***, а задача определения оптимальной перенумерации степеней свободы принадлежит к числу “трудно решаемых задач” (NP-complete) [18], [25], [26].

Для многоядерных компьютеров рекомендуется использовать высокопроизводительный параллельный решатель PARFES, заметно ускоряющий расчет больших задач.

Если при использовании любого из решателей **SCAD** в процессе треугольного разложения матрицы ***K*** один из разрешающих элементов окажется равным нулю, т. е. выяснится, что ***K*** вырождена, что свидетельствует о геометрической изменяемости системы, то производится автоматическое наложение дополнительной ненапряженной связи, превращающей систему в неизменяемую. При этом пользователю предоставляется информация о номерах узлов и типах степеней свободы, по которым произведено наложение связей. Заметим, что вырождение идентифицируется не по точному равенству разрешающего элемента нулю, а по появлению на главной диагонали числа, «практически равного нулю», и выбор этого порога (параметр точности решения) является одним из параметров, которым пользователь может распорядиться сам.

Когда сообщения об установке дополнительных связей появляются в протоколе решения задачи, мы рекомендуем внимательно проанализировать расчетную схему и выяснить причину происхождения геометрической изменяемости конструкции. Может оказаться, что система формально является неизменяемой, но параметры жесткости ее элементов таковы, что она определяется как «почти изменяемая». Тогда для анализа, возможно, следует решить задачу снова с другим значением параметра точности решения.

Дополнительным сервисным средством является контроль решения системы (2.3.1). При появлении сообщения о большой величине ошибки решения, которая, как правило, является следствием плохой обусловленности матрицы ***K***, следует внимательно проанализировать перемещения узлов и убедиться в том, что полученное решение является приемлемым с инженерной точки зрения. Плохая обусловленность чаще всего связана с неудачной конструкцией рассчитываемой системы (например, случаем «почти изменяемой» системы) или ее неудачной идеализацией.

## 2.4. Стандартные случаи динамического загружения

Комплекс **SCAD** дает решения задачи для динамических нагрузок следующих классов:

- модальный анализ;
- пульсации ветрового потока;
- сейсмическая нагрузка;
- импульсная и ударная нагрузка для различных законов изменения во времени;
- гармоническая нагрузка;
- сейсмическое возбуждение в форме задания произвольной акселерограммы;
- прямое интегрирование уравнений движения.

Ниже рассматриваются вопросы, связанные с постановкой соответствующих задач и особенностями их реализации.

### Ветровая нагрузка

В основу методики положен подход из раздела 10 справочника [4], где задача о действии турбулентных пульсаций ветрового потока поставлена как задача статистической динамики.

Давление ветра на сооружение в точке, расположенной на высоте $z$ от уровня земли, рассматривается как сумма статической и пульсационной составляющих ветровой нагрузки

$$q(z,t) = q^s(z) + q^p(z,t). \qquad (2.4.1)$$

Последняя есть случайная функция времени, обусловленная случайной скоростью пульсаций, имеющей нулевое среднее, стандарт $\sigma(z)$ и безразмерный спектр Давенпорта

$$S(\varepsilon) = 1200\ \varepsilon^{5/3} \Big/ \left[ 3\nu_0 (1+\varepsilon^2)^{4/3} \right], \qquad (2.4.2)$$

где $\nu_0$ — среднечасовая скорость ветра на высоте 10 м;

$\varepsilon = \nu_0\ L^{-1}\Omega^{-1}$ — безразмерный период колебаний, где $L$=1200 м — масштаб турбулентности, $\Omega$ — круговая частота (1/с).

С учетом упрощений[1], достигаемых за счет предположения о полной коррелированности (пульсации скорости ветра рассматриваются как синхронные по пространству случайных функций только времени), среднеквадратичное смещение по *j*-й компоненте вектора *Z* представляется в виде

$$Z_{\hat{c}j} = \sum_{i=1}^{s} (\eta^2_{ij} \mu_i^2) / \omega^4_i . \qquad (2.4.3)$$

Здесь *s* — число учитываемых форм собственных колебаний; $\eta_{ij}$ — приведенное ускорение, вычисляемое по формуле

$$\eta_{ij} = \left( \Psi_{ij} \sum_k \sigma_k \Psi_{ik} \right) / \sum_r M_r \Psi_{ir} , \qquad (2.4.4)$$

а квадрат коэффициента динамичности определяется так:

$$\mu_i^2 = (2/3) \int_0^\infty \varepsilon^{11/3} (1 + \varepsilon^2)^{-4/3} \left[ \varepsilon^4 - 2(1 - \gamma^2/2) \varepsilon^2 \varepsilon_i^2 + \varepsilon_i^4 \right]^{-1} d\varepsilon . \qquad (2.4.5)$$

Параметр затухания $\gamma$ связан с логарифмическим декрементом $\delta$ зависимостью $\gamma = \delta/\pi$, а через $\varepsilon_i$ обозначен безразмерный период собственных колебаний $\varepsilon_i = \nu_0 L^{-1}\Omega^{-1}$.

Расчетные статические перемещения связаны с первым слагаемым в (2.4.1), а динамические — определяются по формуле (2.4.3). Усилия в элементах системы и перемещения ее точек (обобщенно — отклик сооружения *X*) находятся раздельно от статической составляющей ветровой нагрузки и от инерционных сил, соответствующих каждой форме собственных колебаний. Суммарное значение отклика определяется по формуле

$$X = X^c \pm \sqrt{\sum_i (X_i^d)^2} , \qquad (2.4.6)$$

из которой видно, что колебания совершаются вокруг смещенного состояния равновесия, соответствующего статической (средней) компоненте загружения. Комплекс выдает отдельные составляющие динамического отклика $X_i^d$ и суммарное значение (2.4.6), причем знак перед вторым слагаемым принимается таким же, как и у компоненты $X^c$.

Суммирование вкладов от отдельных форм собственных колебаний, представленное формулой (2.4.6), называют правилом ККСК («корень квадратный из суммы квадратов»). Как известно, по этому правилу суммируются дисперсии статистически независимых случайных величин, распределенных по закону Гаусса. Предполагается, что такими свойствами обладают амплитудные значения и фазовые углы случайных функций, которые описывают перемещения, возбуждаемые турбулентными пульсациями ветрового потока.

Предположение о статистической независимости вряд ли справедливо для группы форм собственных колебаний, определяемой некой кратной частотой. Колебания по формам этой группы являются фазо-зависимыми, поскольку они порождены общей частотой и поэтому кратные векторы суммируются алгебраически.

Следует также иметь в виду, что для симметричных в плане конструкций, как правило, образуются кратные пары собственных форм, которые определяются с точностью до поворота вокруг вертикальной оси. Векторы этой пары будут ортогональны друг другу, но произвольно повернуты вокруг вертикальной оси, поэтому произвольно ориентированной может оказаться и ориентация алгебраической суммы пары кратных форм.

В связи с этим по специальной команде комплекса выполняется поворот суммарного вектора на такой угол, при котором будет максимизирован его вклад в общую динамическую реакцию конструкции.

[1] Эти упрощения не используются в реализованном в **SCAD** режиме расчета по Московским городским строительным нормам. Решение получается более точным, однако время на его поиск существенно увеличивается.

## Сейсмика

В основу норм (СП 14.13330.2014. Строительство в сейсмических районах (Актуализированная версия СНиП II-7-81*)) положен спектральный подход, в соответствии с которым расчетная спектральная кривая (закон изменения коэффициентов динамичности) определяет динамическую реакцию простого маятника на ускорение точки подвеса при сейсмическом возмущении.

В общем случае при ускорениях основания сооружения $d^2z_0/dt^2$, происходящих при землетрясении, инерционные силы $\boldsymbol{J}(t) = \boldsymbol{M}\, d^2\boldsymbol{Z}/dt^2$ определяются абсолютными ускорениями, которые суммируются с относительными ускорениями от деформации сооружения

$$J_c(t) = M\,(d^2Z/dt^2 - d^2z_0/dt^2), \tag{2.4.7}$$

что при подстановке в (2.2.12) дает фиктивную нагрузку

$$f_c(t) = M\, d^2z_0/dt^2\,. \tag{2.4.8}$$

От воздействия (2.4.8) решение ищется путем разложения по формам собственных колебаний в форме интеграла Дюамеля (см. раздел 3 справочника [4]) и, в конце концов, приводится к расчету на инерционные силы $S_{ik}$, действующие по направлению $k$-й степени свободы при колебаниях по $i$-й форме

$$S_{ik} = Q_k K_c\, \beta(T_i)\eta_{ik} \cos\varphi_{0k}. \tag{2.4.9}$$

Здесь $Q_k$ — вес массы, относящейся к $k$-й степени свободы; $K_c$ — коэффициент сейсмичности, зависящий от бальности землетрясения (напоминаем, что переход к следующему баллу связан с удвоением мощности землетрясения) и от класса сооружения; $\beta$ — коэффициент динамичности, зависящий от периода собственных колебаний рассматриваемой формы и категории грунта основания; $\eta_{ik}$ — приведенные ускорения (2.4.4) (коэффициент, характеризующий распределение инерционных сил по формам собственных колебаний); $\varphi_{0k}$ — угол между направлением смещения $Z_k$ и вектором ускорений основания.

Коэффициенты динамичности определяются обработкой спектральных откликов, простых осцилляторов с собственными частотами $\omega_i$ (периодами $T_i = 2\pi/\omega_i$) и коэффициентом неупругого сопротивления $\gamma$ на воздействие акселерограммы $d^2z_0/dt^2 = a_0(t)$.

Для каждого осциллятора воздействие $a_0(t)$ определяет его отклик (рис. 2.4.1)

$$a_i(\omega_i,\gamma,t) = \omega_i \int_0^t \ddot{z}_0(\tau)\, e^{-\gamma\omega_i(t-\tau)} \sin\omega_i(t-\tau)\, d\tau\,. \tag{2.4.10}$$

Максимальные значения откликов, представленные как функция частоты осциллятора, определяют спектральную кривую исходной акселерограммы,

$$\beta(\omega_i,\gamma) = \max_t \left|a(\omega_i,\gamma,t)\right| = \max_t \left|\omega_i \int_0^t \ddot{z}_0(\tau)\, e^{-\gamma\omega_i(t-\tau)} \sin\omega_i(t-\tau)\, d\tau\right|,$$

а огибающая совокупности спектральных кривых, соответствующих различным возможным акселерограммам, обобщенная соответствующим образом, дает кривую коэффициентов динамичности $\beta(T_i)$.

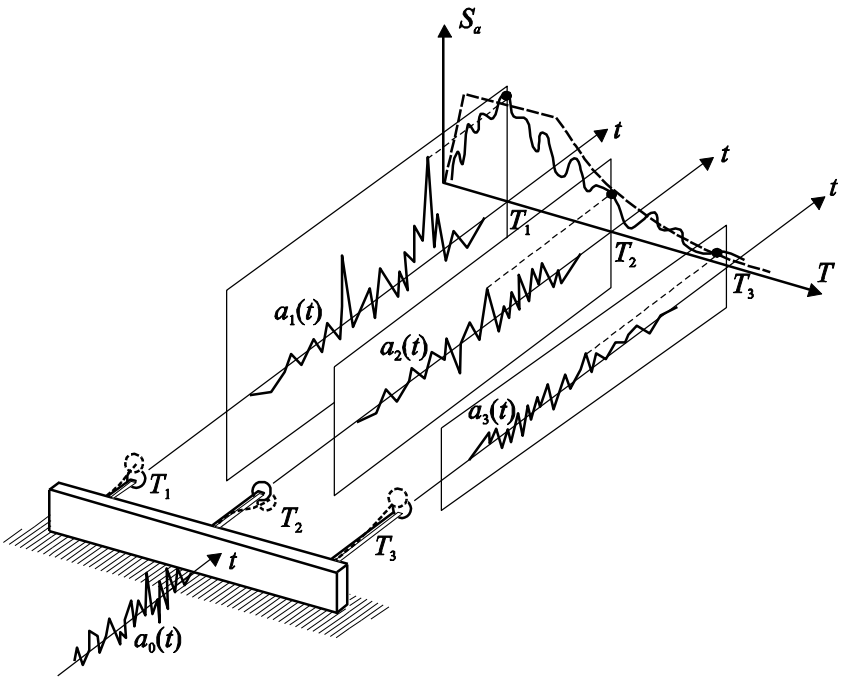



Рис. 2.4-1. К построению кривой коэффициентов динамичности

А коэффициенты $\eta_{ik}$ вычисляются по формуле

$$\eta_{ik} = \Psi_{ik}\left(\sum_{j=1}^{n} Q_j \Psi_{ij}\right) \Bigg/ \left(\sum_{s=1}^{n} Q_s \Psi_{is}^2\right). \qquad (2.4.11)$$

От нагрузок (2.4.9) определяются отклики $X_i$ для каждой из учитываемых форм колебаний и определяется расчетное значение

$$X = \pm\sqrt{\sum_{i=1}^{n} X_i^2 + \sum_{i=1}^{n-1} \rho_i \left| X_i X_{i+1} \right|}, \qquad (2.4.12)$$

где $\rho_i$=2, если $T_{i+1}/T_i \geq 0{,}9$ и $\rho_i$=0, если $T_{i+1}/T_i < 0{,}9$ ($T_i > T_{i+1}$).

При динамических расчетах программа предоставляет возможность добавления остаточных членов. Для каждого направления (X,Y,Z) вычисляется «остаточная форма», добавление которой к множеству ранее определенных собственных векторов дополняет сумму модальных масс по соответствующему направлению до 100%.

### Импульсные нагрузки

Импульсные нагрузки являются кратковременными силами или ударами, время действия которых $\tau$ не превышает $2{,}5T_s$, где $T_s$ — период наименьшей из учитываемых форм колебаний (см. раздел 5 справочника [4]). Различают однократные импульсы, для которых нагрузка $f(t) = 0$ при $t > \tau$, и импульсы многократного действия, из числа которых чаще всего выделяют периодические импульсы, повторяющиеся несколько раз через равные промежутки времени $T_0$.

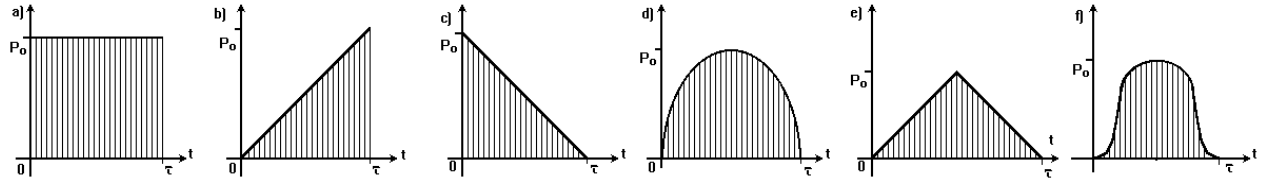



Рис. 2.4-2. *Функции формы импульсных нагрузок*

Импульс характеризуется продолжительностью действия $\tau$, формой $f(t)$ и наибольшим значением $P_0$ (рис. 2.4-2), либо величиной импульса

$$S = P_0 \int_0^{\tau} f(t)\ dt. \tag{2.4.13}$$

При $\tau < 0{,}1T_s$ импульс можно считать мгновенным и не различать формы $f(t)$, поскольку все они приводят практически к тождественным результатам.

При прямом ударе тела массы $M_0$ по конструкции импульс определяется формулой

$$S = M_0 v_0 (1 + k_0), \tag{2.4.14}$$

где $v_0$ – скорость ударяющего тела в начале соударения; $k_0$ – коэффициент восстановления, зависящий от формы и материала соударяющихся тел.

Если масса $M_0$ мала по сравнению с суммой масс сооружения, то расчет на удар можно выполнить так же, как и на импульс величиной (2.4.13), в противном случае $M_0$ следует учесть как присоединенную массу и уточнить таким образом частоты собственных колебаний.

Необходимо отметить, что присоединенная масса $M_0$ не может быть единственной массой системы (удар по безмассовой конструкции не рассматривается!). Форма функции $f(t)$ при ударе рекомендуется колоколообразной (рис. 2.4-2, f).

### Гармоническое возбуждение

Для гармонической нагрузки $P_i^{(1)} \cos\theta t + P_i^{(2)} \sin\theta t$ суммарные по всем учитываемым формам собственных колебаний инерционные силы $S_1$ и $S_2$, соответствующие косинусоидальной (действительной) и синусоидальной (мнимой) составляющим, определяются формулами:

$$S_1 = \sum_i a_i M \Psi_i \ ; \qquad S_2 = \sum_i b_i M \Psi_i, \tag{2.4.15}$$

где коэффициенты

$$a_i = (P_i^{(1)} \chi - P_i^{(2)} \xi\alpha_i)/(\chi^2{}_i + \alpha^2{}_i),$$
$$b_i = (P_i^{(2)} \chi - P_i^{(1)} \xi\alpha_i)/(\chi^2{}_i + \alpha^2{}_i),$$
$$\alpha_i = \theta/\omega_i, \quad \chi_i = 1 - \alpha^2{}_i. \tag{2.4.16}$$

Здесь предполагается, что для всей системы задан единый безразмерный коэффициент демпфирования $\xi$.

Максимальные значения определяются как

$$S = \sqrt{S_1^2 + S_2^2}\,. \tag{2.4.17}$$

В тех случаях, когда частота возмущающей нагрузки $\theta$ больше одной или нескольких собственных частот системы $\omega_i$, необходимо дополнительно проверить систему на прохождение через резонанс во время пуска или остановки машин и агрегатов, развивающих гармоническую нагрузку (см. [4], с.83).

### Расчет по акселерограмме

В перечисленных выше вариантах нагрузок было возможно точное вычисление $y_i(t)$. В остальных случаях решения $y_i(t)$ находим численно.

В частности, при расчете на сейсмическую нагрузку по акселерограмме в каждый $k$-й момент времени $t_k$ задается вектор $f_k = f(t_k)$. Тогда в (2.2.20) имеем дискретный по времени набор обобщенных сил $P_{i,k} = P_i(t_k)$. Эти силы вычисляются по формуле, аналогичной (2.4.9):

$$P_{ik} = Q_k K_c\, a(\omega_i, \gamma, t_k) \eta_{ik} \cos\varphi_{0k}, \tag{2.4.18}$$

где величина $a(\omega_i, \gamma, t_k)$ является откликом акселерограммы $\ddot{z}_0(\tau)$.

Далее уравнения (2.2.19) решаются с использованием интегралов Дюамеля. Поскольку акселерограмма задана с определенным шагом по времени, то в необходимых случаях для высокочастотных компонент, для которых производится сгущение по времени, используется интерполяция в промежуточных точках.

Получаем значения перемещений $y_{i,k} = y_i(t_k)$ и инерционных сил $S_{i,k} = S_i(t_k)$, по которым вычисляется экстремальное из числа рассмотренных моментов времени значение.

## Прямое интегрирование уравнений движения

Особенностями этого режима является то, что перемещения, скорости и ускорения узлов конечно-элементной модели определяются в абсолютной системе отсчета, связанной с условно неподвижной землей. Сейсмическое воздействие задается как вынужденные смещения опор, поэтому входной информацией являются не акселерограммы, а виброграммы (зависимость перемещений от времени), получающиеся из акселерограмм двойным интегрированием по времени. Такой подход позволяет естественным образом решать задачи с асинхронным возмущением опор. Для получения виброграмм из заданных акселерограмм рекомендуется использовать **Редактор Акселерограмм SCAD**.

На рис. 2.4-3 и 2.4-4 представлены соответственно традиционная постановка задачи в системе отчета, связанной с абсолютно жестким подвижным основанием, и постановка задачи в абсолютной системе отсчета, используемая при прямом интегрировании уравнений движения. Для отличия от других режимов динамического расчета здесь для обозначения перемещений используется символ *U*, а не *Z*.

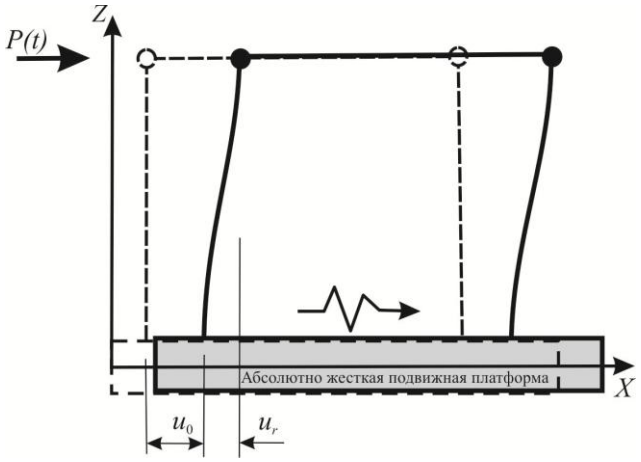



Рис. 2.4-3. Решение задачи в относительной системе отсчета, связанной с абсолютно жесткой подвижной платформой, совершающей поступательное движение (классическая постановка)

В классической постановке задачи:

$$\left.\begin{aligned} &\boldsymbol{u} = \boldsymbol{u}_e + \boldsymbol{u}_r; \\ &\ddot{\boldsymbol{u}} = \ddot{\boldsymbol{u}}_e + \ddot{\boldsymbol{u}}_r; \\ &\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{u}}_r + \boldsymbol{K}\boldsymbol{u}_r = -\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{u}}_e(t) + \boldsymbol{p}(t) \end{aligned}\right\} \qquad (2.4.19)$$

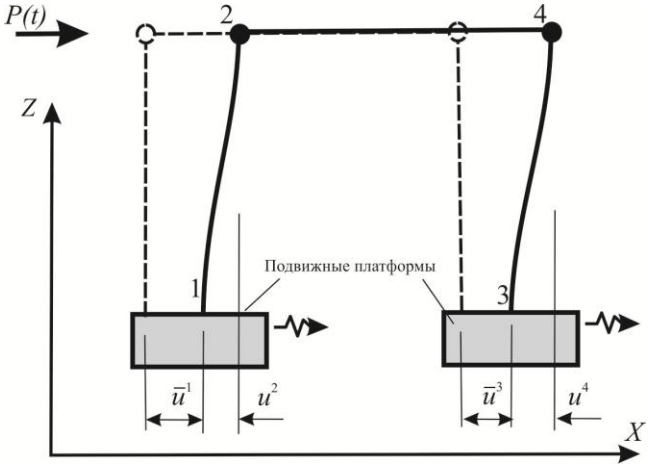



Рис. 2.4-4. Решение задачи в условно неподвижной абсолютной системе отсчета

Постановка задачи, изображенная на рис. 2.4-4, описывается следующей системой уравнений:

$$\underbrace{\begin{pmatrix}\mathbf{M}_{11} & 0\\ 0 & \mathbf{M}\end{pmatrix}}_{\hat{\mathbf{M}}}\cdot\begin{pmatrix}\ddot{\bar{\mathbf{u}}}\\ \ddot{\mathbf{u}}\end{pmatrix}+\underbrace{\begin{pmatrix}\mathbf{K}_{11} & \mathbf{K}_{12}\\ \mathbf{K}_{21} & \mathbf{K}\end{pmatrix}}_{\hat{\mathbf{K}}}\cdot\begin{pmatrix}\bar{\mathbf{u}}\\ \mathbf{u}\end{pmatrix}+\underbrace{\begin{pmatrix}\mathbf{C}_{11} & \mathbf{C}_{12}\\ \mathbf{C}_{21} & \mathbf{C}\end{pmatrix}}_{\hat{\mathbf{C}}}\cdot\begin{pmatrix}\dot{\bar{\mathbf{u}}}\\ \dot{\mathbf{u}}\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}0\\ \mathbf{p}(t)\end{pmatrix},\tag{2.4.20}$$

где

$$\hat{\boldsymbol{u}}=\begin{pmatrix}\bar{\boldsymbol{u}}\\ \boldsymbol{u}\end{pmatrix};\quad \bar{\boldsymbol{u}}=\begin{pmatrix}\bar{u}^1\\ \bar{u}^3\end{pmatrix};\quad \boldsymbol{u}^{\mathsf{T}}=\begin{pmatrix}u^2 & w^2 & \theta^2 & u^4 & w^4 & \theta^4\end{pmatrix},\tag{2.4.21}$$

$\bar{\mathbf{u}}$ – заданные перемещения, $\mathbf{u}$ – перемещения, подлежащие определению, $\hat{\mathbf{M}},\hat{\mathbf{K}},\hat{\mathbf{C}}$ – матрицы жесткости, масс и диссипации, соответствующие полным векторам перемещений, ускорений и скоростей $\hat{\mathbf{u}}, \ddot{\hat{\mathbf{u}}}, \dot{\hat{\mathbf{u}}}$; $\mathbf{M},\mathbf{K},\mathbf{C}$ – матрицы жесткости, масс и диссипации, соответствующие степеням свободы, подлежащим определению (стандартные матрицы МКЭ), матрица $\mathbf{K}_{12}$ собирается из подматриц жесткостей конечных элементов, узлы которых содержат степени свободы вектора вынужденных перемещений $\bar{\mathbf{u}}$, $\mathbf{p}(t)$ – вектор нагрузки.

Демпфирование в материале конструкции учитывается на основании гипотезы Рэлея:

$$\hat{\mathbf{C}}=\alpha\cdot\hat{\mathbf{M}}+\beta\cdot\hat{\mathbf{K}}\,.\tag{2.4.22}$$

Здесь $\alpha$, $\beta$ – коэффициенты пропорциональности, причем слагаемое $\alpha\cdot\mathbf{M}$ отвечает за демпфирование по нижним модам, а $\beta\cdot\mathbf{K}$ – по верхним.

При наличии локальных демпферов появляется не рэлеевская матрица диссипации $\hat{\mathbf{C}}$. Если при этом демпфирование в материале отсутствует, то следует задавать $\alpha = \beta = 0$. В противном случае будет учтено как демпфирование, обусловленное локальными демпферами, так и демпфирование в материале.

Из (2.4.20) с учетом (2.4.22) получаем:

$$\mathbf{M}\left(\ddot{\mathbf{u}}+\alpha\cdot\dot{\mathbf{u}}\right)+\mathbf{K}\left(\mathbf{u}+\beta\cdot\dot{\mathbf{u}}\right)=-\mathbf{K}_{21}\left(\bar{\mathbf{u}}(t)+\beta\cdot\dot{\bar{\mathbf{u}}}(t)\right)+\mathbf{p}(t)\,.\tag{2.4.23}$$

Если в классической постановке вынужденное смещение опор представляется обычно акселерограммой, то в предлагаемой постановке задается функция перемещений $\bar{\mathbf{u}}(t)$, а функция скорости $\dot{\bar{\mathbf{u}}}(t)$ определяется в результате численного дифференцирования последней.

Пусть

$$\bar{\mathbf{u}}(t)=\sum_{s=1}^{M_s}\mu_s\cdot\mathbf{k}_s\cdot f_s\left(t-t_0^s\right),\quad \dot{\bar{\mathbf{u}}}(t)=\sum_{s=1}^{M_s}\mu_s\cdot\mathbf{k}_s\cdot \dot{f}_s\left(t-t_0^s\right),\tag{2.4.24}$$

где $\mathbf{k}_s$ – векторы пространственной конфигурации, задающие форму вынужденных смещений, $f_s(t)$ – функции времени, $s = 1, 2, \cdots, M_s$ – номера статических загружений при расчете на соответствующие вынужденные смещения.

Аналогично $\mathbf{p}(t)=\sum_{p=1}^{N_p}\mu_p\cdot\mathbf{k}_p\cdot f_p\left(t-t_0^p\right)$, где $p=1,2,\ldots,N_p$ – номера статических загружений при расчете на силовые воздействия, $\mathbf{k}_p$ – векторы пространственной конфигурации нагрузки, $f_p(t)$ – функции времени.

Величины $\mu_s, t_0^s, \mu_p, t_0^p$ задают масштабный множитель и время запаздывания. Будем называть каждое слагаемое приведенных выше сумм соответственно *p*-ой или *s*-ой составляющей динамического загружения. Обозначим

$$\mathbf{b}_s=-\mathbf{K}_{21}\cdot\mathbf{k}_s,\quad s=1,2,\ldots,M_s\,.\tag{2.4.25}$$

Приведенная ниже задача Коши описывает уравнения движения в изложенной постановке

$$\left.\begin{aligned} &\boldsymbol{M}\left(\ddot{\boldsymbol{u}}+\alpha\cdot\dot{\boldsymbol{u}}\right)+\boldsymbol{K}\left(\boldsymbol{u}+\beta\cdot\dot{\boldsymbol{u}}\right)= \\ &\quad=\sum_{s=1}^{M_s}\boldsymbol{b}_s\cdot\mu_s\cdot\left[\,f_s\left(t-t_0^s\right)+\beta\cdot\dot{f}_s\left(t-t_0^s\right)\right]+\sum_{p=1}^{N_p}\boldsymbol{k}_p\cdot\mu_p\cdot f_p\left(t-t_0^p\right) \\ &\boldsymbol{x}\left(0\right)=\boldsymbol{x}_0 \\ &\dot{\boldsymbol{x}}\left(0\right)=\dot{\boldsymbol{x}}_0 \end{aligned}\right\}. \qquad (2.4.26)$$

Для решения задачи мы используем безусловно устойчивый вариант метода Ньюмарка в форме «предиктор-корректор».

## 2.5. Устойчивость равновесия

### Разрешающие уравнения

Будем рассматривать равновесие системы, у которой в начальной конфигурации выполняются условия

$$\boldsymbol{K_0}\,\boldsymbol{Z} = \boldsymbol{f}, \qquad (2.5.1)$$

а под влиянием приращения нагрузки на величину $\delta\boldsymbol{f}$ приращения усилий $\delta\boldsymbol{s}$ и перемещений $\delta\boldsymbol{Z}$ таковы, что компоненты вектора дополнительных перемещений $\delta\boldsymbol{Z}$ относительно невелики, но все же требуют геометрически нелинейного анализа. Тогда, как известно [20], уравнения в вариациях можно представить в форме

$$[\boldsymbol{K_0} + \boldsymbol{K}_1(\boldsymbol{s_0}) + \boldsymbol{K}_2(\boldsymbol{Z_0})]\delta\boldsymbol{Z} = (\boldsymbol{K_0} + \boldsymbol{K}_\mathrm{G})\delta\boldsymbol{Z} = \delta\mathbf{f}. \qquad (2.5.2)$$

Здесь к обычной матрице жесткости $\boldsymbol{K_0}$ добавляется матрица начальных напряжений $\boldsymbol{K}_1(\boldsymbol{s_0}) = \boldsymbol{T}(\boldsymbol{s_0})$, линейно зависящая от усилий в системе перед началом приращения нагрузки, и матрица начальных поворотов $\boldsymbol{K}_2(\boldsymbol{Z_0})$, не более чем квадратично зависящая от перемещений. В уравнениях (2.5.2) не представлена матрица начального нагружения Дж. Одена [21], которая корректирует нагрузку. Неучет матрицы начального нагружения говорит о том, что предполагается независимость нагрузки от конфигурации системы или же считается, что соответствующие коррективы введены при формировании вектора приращений $\delta\boldsymbol{f}$. Матрицу $\boldsymbol{K}_\mathrm{G}$ принято называть *матрицей геометрической жесткости*.

### Однопараметрическое загружение

Рассмотрим систему, находящуюся в равновесии в состоянии, для которого выполняются уравнения (2.5.2), и напишем равенства, определяющие изменения при пробном нагружении силами, пропорциональными одному параметру, т. е. при приращении нагрузки $\lambda\delta\boldsymbol{f}$. Обозначая соответствующие изменения сил и перемещений как $\lambda\delta\boldsymbol{s}$ и $\lambda\delta\boldsymbol{Z}$, имеем

$$[\boldsymbol{K_0} + \boldsymbol{K}_1(\boldsymbol{s_0} + \lambda\times\delta\boldsymbol{s}) + \boldsymbol{K}_2(\boldsymbol{Z_0} + \lambda\times\delta\boldsymbol{Z})]\ \delta\boldsymbol{Z} = \delta\boldsymbol{f}. \qquad (2.5.3)$$

Теперь используем новую матрицу жесткости для того, чтобы найти критическое значение нагрузки $\boldsymbol{f}_{\text{кр}} = \boldsymbol{f_0} + \delta\boldsymbol{f}$, раскладывая $\boldsymbol{K}_1$ и $\boldsymbol{K}_2$ из (2.5.3) в ряд с сохранением членов, линейно зависящих от $\lambda$, получаем уравнение

$$\{[\boldsymbol{K_0} + \boldsymbol{K}_1(\boldsymbol{s_0}) + \boldsymbol{K}_2(\boldsymbol{Z_0})] + \lambda\,[\boldsymbol{K}_1(\delta\boldsymbol{s}) + \boldsymbol{K}_2(\boldsymbol{Z_0}\,,\delta\boldsymbol{Z})]\}\delta\boldsymbol{U} = \boldsymbol{0}. \qquad (2.5.4)$$

или

$$[\boldsymbol{K_0} + \lambda\Delta\boldsymbol{K}_\mathrm{G}(\delta\boldsymbol{s},\boldsymbol{Z_0}\,,\delta\boldsymbol{Z})]\delta\boldsymbol{U} = \boldsymbol{0}, \qquad (2.5.5)$$

где $\delta\boldsymbol{U}$ — собственный вектор, характеризующий форму потери устойчивости системы, а через $\Delta\boldsymbol{K}_\mathrm{G}$ обозначен матричный множитель, стоящий в квадратных скобках справа от $\lambda$ в уравнении (2.5.4).

Проблема собственных значений (2.5.5) основана на решении задачи в линейном приближении для окрестности смещенного состояния равновесия, отсюда можно получить и линейную задачу устойчивости, полагая все начальные усилия и начальные перемещения равными нулю. Если при

этом еще пренебречь квадратичными слагаемыми в матрице начальных смещений, то получим, что левая часть (2.5.3) линейно зависит от нагрузки

$$\{\boldsymbol{K_0} + \lambda\,[\boldsymbol{K}_1(\delta\boldsymbol{s}) + \boldsymbol{K}_2(\delta\boldsymbol{Z})]\}\;\delta\boldsymbol{U} = \boldsymbol{0}. \qquad (2.5.6)$$

Допущение о независимости критической нагрузки от перемещений $\lambda\delta\boldsymbol{Z}$ приводит к исчезновению матрицы $\boldsymbol{K}_2$, и мы приходим к уравнениям эйлерова типа для критической нагрузки

$$[\boldsymbol{K_0} + \lambda\,\boldsymbol{K}_1(\delta\boldsymbol{s})]\;\delta\boldsymbol{U} = \boldsymbol{0}. \qquad (2.5.7)$$

Наименьшее собственное значение этого уравнения $\lambda_1$ определяет критическую нагрузку как $\lambda_1\delta\boldsymbol{f}$, а сама величина $\lambda_1$ является коэффициентом запаса по устойчивости, и вектор $\lambda_1\delta\boldsymbol{s} = \boldsymbol{S}^*$ определяет внутренние усилия в системе при потере устойчивости.

Полезно обратить внимание на то обстоятельство, что при использовании уравнений эйлерового типа, по сути, предполагается неизменность распределения внутренних усилий в системе при увеличении интенсивности нагружения $\lambda$. Это свойство не всегда выполняется, в особенности для нелинейно деформирующихся систем. Поэтому некоторые программные разработки [9] определяют два критических значения нагрузки — первое является наименьшим критическим значением $\lambda_1$ уравнений типа (2.5.7), а второе определяется как интенсивность нагрузки, при которой теряется положительная определенность уравнений типа (2.5.2) в процессе некоторого более или менее реалистического закона нагружения (например, при увеличении интенсивности только временной нагрузки и неизменном значении постоянной нагрузки), который моделируется шаговой процедурой.

При этом возникает нетривиальная задача о выборе того критического значения, которое следует продемонстрировать как свидетельство достаточности полученного коэффициента запаса по устойчивости. К сожалению, нормы проектирования, регламентирующие то или иное значение коэффициента запаса по устойчивости, ничего не говорят об этом, хотя, по некоторым косвенным свидетельствам, можно предположить, что чаще всего имеется в виду эйлеров случай.

Полезно также указать на тот вариант задачи устойчивости равновесия, когда при одновременном действии на систему двух вариантов загружения $\boldsymbol{f}_1$ и $\boldsymbol{f}_2$ изменяется только одно из них, а второе остается стабильным. Тогда вместо (2.5.3) будем иметь

$$[\boldsymbol{K_0} + \boldsymbol{K}_1(\boldsymbol{s_0} + \lambda\times\delta\boldsymbol{s}) + \boldsymbol{K}_2(\boldsymbol{Z_0} + \lambda\times\delta\boldsymbol{Z})]\;\delta\boldsymbol{Z} = \delta\boldsymbol{f}_1 + \boldsymbol{f}_2, \qquad (2.5.8)$$

и коэффициент запаса $\lambda_1$ будет относиться к возможной величине возрастания нагрузки $f_1$. Соответствующий режим также присутствует в комплексе **SCAD**.

### Роль отдельных подсистем

При анализе особенностей проявления возможной неустойчивости используются понятия *стесненного и принужденного состояний* отдельных элементов системы при потере системой устойчивости [13]. Считается, что при потере системой устойчивости отдельный ее элемент находится в стесненном состоянии, если, будучи отделенным от других частей системы, он потеряет устойчивость при меньшей интенсивности нагрузки, передаваемой на этот элемент. Если же при таком «изолированном рассмотрении» для потери устойчивости элемента необходимо приложить нагрузку большей интенсивности или же он вообще не теряет устойчивости, то говорят о принужденной потере устойчивости такого элемента. Естественно, что эти понятия сказываются на стратегии усиления системы, если признано, что общий коэффициент запаса устойчивости недостаточен. Обычно в этом случае начинают с увеличения сечений тех элементов, которые находятся в стесненном состоянии, но при этом следует помнить, что такая мера эффективна лишь до определенного предела, который характеризуется тем, что усиливаемая подсистема приобретает такую же «мощность», как и остальные части конструкции. Для эффективности дальнейшего усиления надо усиливать все сжатые элементы одновременно, сохраняя достигнутое состояние равноустойчивости элементов системы [13, с. 254].

Понятия стесненного и принужденного состояний по отношению к выделенным фрагментам конструкции, введенные в инженерный обиход уже более полувека назад, позволяют формировать целенаправленную стратегию усиления конструкции, несущая способность которой определяется

условиями ее устойчивости. А между тем, формальный вычислительный инструмент, особенно необходимый в компьютеризованных условиях проектирования, насколько известно авторам, до сих пор не был выработан. Это тем более удивительно, что такой инструмент в алгоритмическом смысле на удивление прост и очевиден.

В самом деле, проверка роли отдельных подсистем может быть произведена при подсчете значения энергии, накапливаемой в различных частях системы, при ее деформировании по форме потери устойчивости. Для системы в целом эта энергия равна нулю

$$E = 0{,}5(\boldsymbol{Z}^*)^T[\boldsymbol{K}_0 - \boldsymbol{K}_1(\boldsymbol{S}^*)]\boldsymbol{Z}^* = 0. \qquad (2.5.9)$$

Если система мысленно разбита на какие-то две части, то для любой из этих частей может быть составлена матрица жесткости $\boldsymbol{K}_{\mathbf{0},i} - \boldsymbol{K}_{1,i}(\boldsymbol{S}^*)$ ($i$ = 1, 2), которую мы будем представлять дополненной нулями до размера полной матрицы жесткости системы. Вычисляя значение

$$E_1 = 0{,}5(\boldsymbol{Z}^*)^T[\boldsymbol{K}_{0,1} - \boldsymbol{K}_{1,1}(\boldsymbol{S}^*)]\boldsymbol{Z}^* \qquad (2.5.10)$$

и значение

$$E_2 = 0{,}5(\boldsymbol{Z}^*)^T[\boldsymbol{K}_{0,2} - \boldsymbol{K}_{1,2}(\boldsymbol{S}^*)]\boldsymbol{Z}^*, \qquad (2.5.11)$$

мы всегда получим величины различных знаков, поскольку их сумма должна равняться нулю. Этим определяется та подсистема (ей соответствует $E_i < 0$), которую целесообразнее ужесточить или дополнительно раскрепить. Соотнося эти величины с понятиями стесненного и принужденного состояний, несложно догадаться, что, если $E_i < 0$, то соответствующая $i$-ая подсистема находится в стесненном состоянии, в противном случае при $E_i > 0$ — в принужденном состоянии. Грубо говоря, именно те элементы конструкции, которые находятся в стесненном состоянии, в первую очередь виновны в том, что система теряет устойчивость.

Естественно, что можно расчленять конструкцию не на две части, а на большее количество частей, вплоть до отдельных элементов с последующим сопоставлением вклада каждого элемента в отрицательную и положительную части общей энергии и получением рекомендаций по усилению/ослаблению отдельных элементов. При этом можно более подробно установить роль отдельных элементов в общей картине потери устойчивости.

Следует заметить, что при использовании результатов описанного анализа для принятия решений о модификации элементов или подсистем полезно проявить определенную сдержанность. Дело в том, что подсчет энергии реализуется с помощью формы потери устойчивости $\boldsymbol{Z}^*$, которая была определена для системы с первоначальным распределением жесткостей и усилий, а при их изменениях эта форма также меняется. Поэтому результат модификации подлежит обязательной проверке. Кроме того, и это более существенно, при усилении отдельных элементов имеется определенная граница, выше которой эта операция уже не сказывается на результатах. Справедливость этого утверждения легко понять, если заметить, что даже бесконечное увеличение жесткости одной из частей системы не приведет к такому же росту коэффициента запаса, поскольку система начнет терять устойчивость по «локальной» форме, без деформирования ее переужесточенной части. По-видимому, впервые на это свойство задачи устойчивости упругих систем обратил внимание И.Г.Бубнов, который указал, что в задаче устойчивости балки на упругих опорах существует некоторая критическая жесткость этих опор, за которой дальнейшее увеличение жесткости опор не приводит к увеличению критической силы, а сами опоры с критической жесткостью ведут себя как абсолютно недеформируемые [24].

## 2.6. Расчетные сочетания усилий (РСУ)

Основой выбора невыгодных расчетных сочетаний усилий в **SCAD** служит принцип суперпозиции. С целью ограничения количества рассматриваемых сочетаний усилий (РСУ) для каждого вида напряженного состояния используется свой подход. Из $2^n$ сочетаний (где $n$ — количество загружений) отбираются те РСУ, которые соответствуют максимальному значению некоторой величины, избранной в качестве критерия и зависящей от всех компонентов напряженного состояния.

## Стержни

В качестве критерия определения РСУ здесь приняты экстремальные значения нормальных и касательных напряжений в контрольных точках сечения (рис. 2.6-1).

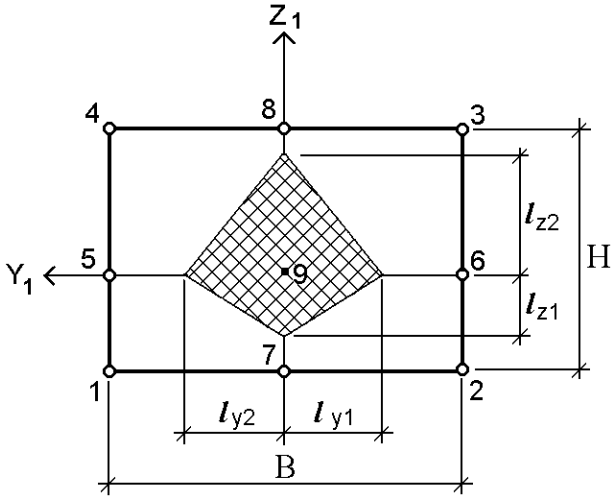



Рис. 2.6-1. *Нумерация контрольных точек*

Для нормальных напряжений используется формула

$$\sigma_k = \frac{N}{F} \pm \frac{M_y z}{I_y} \pm \frac{M_z y}{I_z}, \tag{2.6.1}$$

где $k$ — точка сечения стержня ($k$ = 1,…, 9). Эта формула преобразуется следующим образом при $y = \pm\frac{b}{2}$ и $z = \pm\frac{h}{2}$;

$$\sigma_k F = N \pm \frac{M_y}{l_{z,i}} \pm \frac{M_z}{l_{y,i}}, \tag{2.6.2}$$

где $l_{y,i}$ и $l_{z,i}$ — ядровые расстояния в сечении стержня ($i$ = 1, 2).

Для поиска невыгодного значения эксцентриситета используется критерий

$$\sigma_k F = N \pm \frac{M_y}{l_{z,i}} \sin\frac{n\pi}{8} \pm \frac{M_z}{l_{y,i}} \sin\frac{m\pi}{8}, \tag{2.6.3}$$

где $m$, $n$=0, 1, 2, 3, 4.

Данный критерий важен для железобетонных конструкций.

Такой подход позволяет определить экстремальные нормальные напряжения в сечении любой формы.

Для касательных напряжений используется приближенная формула

$$\tau_{y,z} F = \frac{Q_{y,z}}{2} \pm \frac{M_{кр}}{2(l_{y1,z1} + l_{y1,z2})}. \tag{2.6.4}$$

Кроме напряжений, вычисляются также экстремальные значения продольной и перерезывающих сил.

### Мембраны (плоское напряженное состояние)

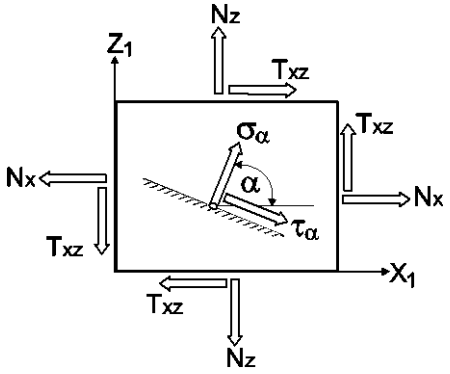



Рис. 2.6-2. *Напряжения на наклонных площадках*

В общем случае главные напряжения в одной и той же точке конструкции при различных загружениях имеют различную ориентацию. Поэтому здесь определение РСУ производится по огибающим экстремальным кривым нормальных и касательных напряжений по формулам:

$$\sigma(\alpha) = N_x \cos^2\alpha + N_z \sin^2\alpha + T_{xz} \sin 2\alpha; \quad (2.6.5)$$

$$\tau(\alpha) = \frac{1}{2}\left(N_z - N_x\right)\sin 2\alpha + T_{xz}\cos 2\alpha \cdot \quad (2.6.6)$$

Нормальные напряжения вычисляются в диапазоне от 90° до –90°, а касательные – от 90° до 0°.

### Плиты

Здесь применяется подход, аналогичный тому, что описан для мембран (плоское напряженное состояние). Изгибные и крутящий моменты в плите дают возможность определить нормальные и касательные напряжения на верхней и нижней поверхностях плиты. Эти напряжения по модулю равны, поэтому формулы (2.6.5) и (2.6.6) приобретают вид:

$$M(\alpha) = M_x \cos^2\alpha + M_y \sin^2\alpha + M_{xy} \sin 2\alpha; \quad (2.6.7)$$

$$M_k(\alpha) = \frac{1}{2}\left(M_y - M_x\right)\sin 2\alpha + M_{xy}\cos 2\alpha. \quad (2.6.8)$$

Кроме того, определяются экстремальные значения перерезывающих сил.

### Оболочки

Здесь применяется подход, аналогичный тому, что описан для мембран (плоское напряженное состояние). Однако вычисляются напряжения на верхней и нижней поверхностях оболочки с учетом мембранных напряжений и изгибающих усилий по следующим зависимостям:

$$\sigma_x^{\text{H/B}} = N_x \pm \frac{6M_x}{h^2};\ \ \sigma_y^{\text{H/B}} = N_y \pm \frac{6M_y}{h^2};\ \ \tau^{\text{H/B}} = T_{xy} \pm \frac{6M_{xy}}{h^2}, \quad (2.6.9)$$

где $h$ — толщина оболочки; В и Н — индексы, обозначающие принадлежность к верхней и нижней поверхностям.

### Загружения

При определении РСУ учитываются логические связи между загружениями, которые отражают физический смысл загружений и требования, регламентируемые различными нормативными документами.

Выделяются три типа загружений:

1) *независимые* (собственный вес, вес оборудования и т. п.);

2) *взаимоисключающие* (ветер слева и ветер справа, сейсмическое воздействие вдоль разных осей координат и т. п.);

3) *сопутствующие* (тормозные при наличии вертикальных крановых нагрузок и т. п.).

Предоставляется также возможность обозначить знакопеременность загружения при одинаковом модуле его вектора.

## 2.7. Учет последовательности монтажа

Процесс фактического создания сложной системы в общем случае является многоэтапным и тесно увязан с последовательностью выполняемых операций по сборке системы. При этом в том или ином порядке могут выполняться работы по установке и удалению некоторых элементов системы,

установке или удалению балластных грузов, регулированию длин тех или иных элементов, изменению состояния некоторых связей и т. п.

Большинство из действий, выполняемых в процессе монтажа, приводит к изменению расчетной схемы и/или напряженного и деформированного состояния системы.

### Элементарные операции

В программе **SCAD** имеется некоторый набор элементарных операций, последовательность которых дает возможность выполнить все необходимые преобразования расчетной схемы для определения напряженно-деформированного состояния (НДС) в процессе монтажа и создания предварительного напряжения системы.

Предусмотрены следующие элементарные операции:

**A)** *Нагружение системы известным воздействием*, представляющим собой набор заданных нагрузок, дислокаций и температурных воздействий.

**B)** *Установка внешней связи* в узле системы, запрещающей изменение определенного перемещения или поворота. Необходимо отметить, что речь идет именно о запрете дальнейшего (на последующих стадиях) изменения перемещения, а не об обнуления его величины.

**C)** *Установка внутренней связи* между узлами системы, запрещающей изменение определенного взаимного перемещения или поворота этих узлов (в том числе и задание объединения перемещений). Здесь также речь идет о запрете дальнейших (на последующих стадиях) изменений взаимных перемещений, и это обстоятельство способствует замыканию в системе деформаций, несовместных на предыдущих стадиях.

**D)** *Снятие внешней связи,* когда меняется не только расчетная схема, но и НДС. Последнее происходит из-за того, что в общем случае удаляемая связь является напряженной, и перед изменением расчетной схемы необходимо обнулить усилие в удаляемой связи.

**E)** *Снятие внутренней связи (отказ от объединения перемещений),* когда меняется не только расчетная схема, но и НДС. Последнее происходит из-за того, что в общем случае удаляемая связь является напряженной, и перед изменением расчетной схемы необходимо обнулить усилие в удаляемой связи.

**F)** *Монтаж элемента* любого типа.

**G)** *Демонаж элемента* связан не только с изменением расчетной схемы, но и с необходимостью учета изменения НДС. Поскольку в преобразованной системе на оставшуюся часть со стороны удаленной части не должно быть никаких воздействий, то рассматриваемая элементарная операция состоит, по сути, из двух шагов:

- обнуление усилий взаимодействия между остающейся и удаляемой частями системы;
- изменение расчетной схемы.

Рассматриваемая элементарная операция является некоторым обобщением операции «удаление внешней связи», и для ее реализации может применяться особый подход, а именно — можно представить, что элементы (связи) удалены из системы, а их действие на оставшуюся часть заменено силами $N_j$, которые существовали в удаленных элементах (связях), и эти силы затем подавляются приложением нагрузки $P_j = -N_j$.

Наконец, здесь следует заметить, что удаление элемента (снятие связи) трактуется не как его разрушение, а как активное вмешательство в конструкцию при ее создании. Так удаляются временные раскрепления и подпорки, установленные на промежуточных этапах монтажа. При этом они сперва приводятся в ненапряженное состояние (раздвигаются клинья, на которые опираются такие подпорки, или выполняются аналогичные действия).

**H)** Изменение модуля упругости элемента для текущей и всех последующих стадий монтажа, с помощью которого можно имитировать процесс твердения бетона, износ конструкции и другие явления, ведущие к изменению жесткости элемента. И здесь следует отметить, что речь идет не о моделировании процесса нагружения, когда при изменении напряженного состояния меняется касательный модуль упругости, а об учете некоторых немеханических эффектов, в том числе и условном «уничтожении жесткости» в процессе «гибели» элемента.

При этом, если твердение бетона, как правило, не требует пересчета НДС, то уменьшение жесткости требует другого подхода. В ВК **SCAD** данный вариант моделируется следующим образом:

- устанавливается рядом со старым напряженным элементом новый ненапряженный с измененными жесткостями;
- удаляется напряженный старый элемент с сохранением за новым элементом его номера.

**I)** Назначение или изменение коэффициентов постели для текущей и всех последующих стадий монтажа. При этом, если увеличение жесткости основания, как правило, не требует пересчета НДС, то его уменьшение требует другого подхода. Разделив элементы как бы на два: оболочка и упругое основание, определив независимо реакции каждого из них из общих реакций, в дальнейшем поступаем так же, как и в предыдущем случае.

### Соглашение о нагрузках

Воздействия на систему, определяющие характер ее напряженного и деформированного состояния, разбиваются на два класса:

- *базовые* (накапливаемые) воздействия, для которых напряженно-деформированное состояние передается на последующие стадии монтажа;
- *независимые* нагружения, действующие только на текущей стадии монтажа и не имеющие отношения к другим стадиям.

Типичными примерами базового воздействия является собственный вес или предварительное напряжение, а примером независимого воздействия может служить ветровая нагрузка на здание, находящееся в процессе сборки.

В системе **SCAD** действует соглашение, что все базовые воздействия должны быть отнесены к одному, заранее предопределенному (например, первому) загружению. Состав этого загружения может меняться на различных стадиях монтажа за счет включения или исключения определенных групп нагрузок.

### Варианты модификации схемы

Можно рассматривать два приема включения и удаления элементов в систему («рождения» и «смерти»). Эти варианты иллюстрирует рис. 2.7-1.

В первом случае (операция F) рассматривается отличная от предыдущей конструкция, не имеющая удаленных элементов и состоящая только из включенных элементов. Здесь включение нового элемента в расчетную схему отличается тем, что часть его узлов присоединяется к уже смонтированной под нагрузкой конструкции, а другие узлы полагаются находящимися в проектном положении, что приводит к изломанной расчетной модели.

Во втором случае (операция H) "убитые" элементы не удаляют. Вместо этого она деактивируется умножением их жесткости на ощутимый коэффициент уменьшения, например, на $10^{-6}$.

Расчет по первому способу особенно уместен при проектировании многоэтажных зданий с железобетонным каркасом, когда при возведении каждого этажа опалубка выставляется таким образом, чтобы верхняя поверхность бетонируемого перекрытия получилась горизонтальной. По существу корректируется проектная длина колонн, которые наращиваются на величину просадки уже возведенной части здания.

Расчет вторым способом дает возможность моделировать «примыкание по касательной» (см. рис. 2.7-1, вариант 2), которое уместно при расчете конструкций, возведение которых реализуется методом навесной сборки.

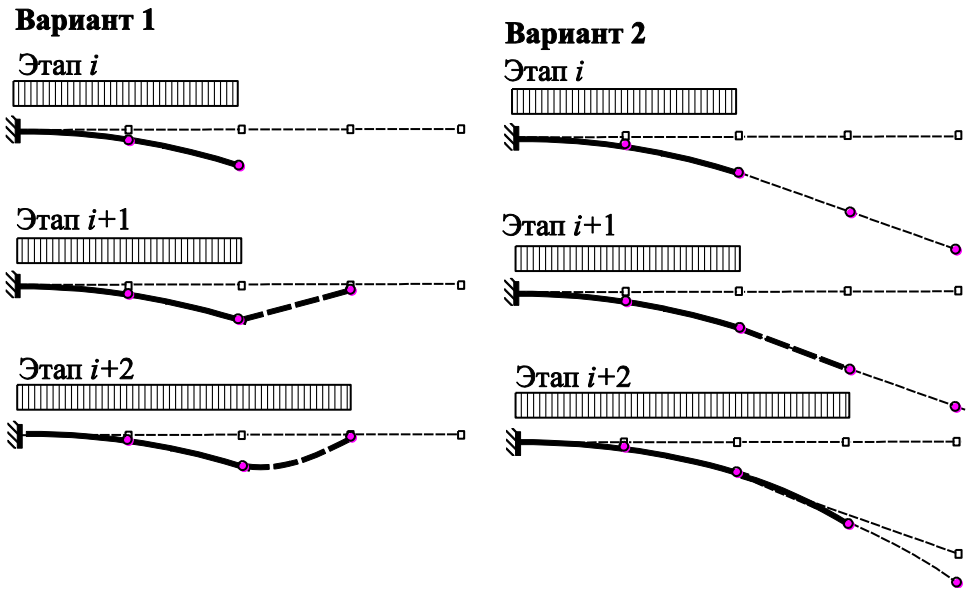



Рис. 2.7-1. Два варианта наращивания сооружения

## Конечно-элементные процедуры

Если рассматривать многостадийный процесс монтажа, то для каждой стадии в отдельности можно использовать любой из классических методов строительной механики, но, с учетом специфики многоэтапного расчета, полезно представить эти методы в форме, где отражается переменность системы. Для разрешающих уравнений метода перемещений, например, будем писать

$$\mathbf{K}^{(r)}\,\Delta\mathbf{u}^{(r)} = \Delta\mathbf{q}^{(r)}, \tag{2.7.1}$$

где $\mathbf{K}^{(r)}$ — матрица жесткости системы на $r$-том этапе, а $\Delta\mathbf{u}^{(r)}$ и $\Delta\mathbf{q}^{(r)}$ — векторы дополнительных перемещений и дополнительных приведенных узловых нагрузок, относящихся к $r$-му этапу соответственно. Зная $\Delta\mathbf{u}^{(r)}$, можно определить приращения усилий $\Delta\mathbf{s}^{(r)}$ и получить накопленные по всем $r$ этапам значения перемещений $\mathbf{u}^{(r)}$ и усилий $\mathbf{s}^{(r)}$

$$\mathbf{u}^{(r)} = \mathbf{u}^{(r\text{-}1)} + \Delta\mathbf{u}^{(r)}, \tag{2.7.2}$$

$$\mathbf{s}^{(r)} = \mathbf{s}^{(r\text{-}1)} + \Delta\mathbf{s}^{(r)}. \tag{2.7.3}$$

Такое поэтапное суммирование компонент НДС необходимо проводить в силу отмеченного выше свойства памяти системы. Соотношения (2.7.2) и (2.7.3) являются *законами наследования монтажных состояний конструкции*. Одновременное выполнение линейных соотношений (2.7.1) и законов наследования (2.7.2) — (2.7.3) как раз и порождает генетическую нелинейность задачи.

При переходе к следующему ($r$+1)-му этапу расчета меняется матрица жесткости $\mathbf{K}^{(r)}$, которая получает приращение $\Delta\mathbf{K}^{(r)}$, положительное – при добавлении элементов и отрицательное – при их выбытии, то есть

$$\mathbf{K}^{(r+1)} = \mathbf{K}^{(r)} + \Delta\mathbf{K}^{(r)},$$

или подробнее:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{11}^{(r)} & \mathbf{K}_{12}^{(r)} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{K}_{21}^{(r)} & \mathbf{K}_{22}^{(r+1)} & \mathbf{K}_{23}^{(r+1)} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{K}_{32}^{(r+1)} & \mathbf{K}_{33}^{(r+1)} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{11}^{(r)} & \mathbf{K}_{12}^{(r)} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{K}_{21}^{(r)} & \mathbf{K}_{22}^{(r)} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \Delta\mathbf{K}_{22}^{(r)} & \Delta\mathbf{K}_{23}^{(r)} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \Delta\mathbf{K}_{32}^{(r)} & \Delta\mathbf{K}_{33}^{(r)} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix}$$

Система разрешающих уравнений ($r$+1)-го этапа имеет вид

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{11}^{(r)} & \mathbf{K}_{12}^{(r)} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{K}_{21}^{(r)} & \mathbf{K}_{22}^{(r+1)} & \mathbf{K}_{23}^{(r+1)} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{K}_{32}^{(r+1)} & \mathbf{K}_{33}^{(r+1)} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta\mathbf{u}_1^{(r+1)} \\ \Delta\mathbf{u}_2^{(r+1)} \\ \Delta\mathbf{u}_3^{(r+1)} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \Delta\mathbf{q}_2^{(r+1)} \\ \Delta\mathbf{q}_2^{(r+1)} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}. \qquad (2.7.4)$$

В некоторых случаях изменения расчетной схемы связаны с корректировкой параметров тех или иных ранее смонтированных элементов (изменение модуля упругости, коэффициента постели упругого основания и т. п.). В этом случае можно полагать, что происходит замена ранее введенной, например, на *s*–м этапе матрицы жесткости $\Delta\mathbf{K}^{(s)}$ на новую матрицу $\Delta\mathbf{K}^{(r)}$:

$$\mathbf{K}^{(r+1)} = \mathbf{K}^{(r)} - \Delta\mathbf{K}^{(s)} + \Delta\mathbf{K}^{(r)}. \qquad (2.7.5)$$

Понятно, что для воздействий, относящихся к различным стадиям одного и того же этапа монтажа, действуют обычные линейные законы механики, а расчетная схема конструкции меняется только при переходе к следующему монтажному этапу. В этой связи под приращениями $\Delta\mathbf{u}_r$ и $\Delta\mathbf{s}_r$ следует понимать изменение перемещений и усилий, произошедшее от момента завершения последней стадии предшествующего этапа монтажа.

Заметим, что в некоторых случаях часть нагрузок действует только в рамках *r*-го этапа монтажа, и при переходе к последующим этапам снимается. Такая ситуация типична, например, для навесного монтажа конструкции, когда вес кранового оборудования учитывается при формировании вектора $\Delta\mathbf{q}_r$ с расположением кранов, соответствующих именно этому этапу. При переходе к следующему (*r*+1)-му этапу монтажа вектор узловых нагрузок формируется с учетом нового положения кранового оборудования, но при этом нужно помнить о необходимости приложения на (*r*+1)-м этапе отрицательных крановых нагрузок, аннулирующих их воздействия на систему, относящиеся к предыдущему этапу. Если этого не сделать, то законы наследования (2.7.2) и (2.7.3) не будут работать.

Итак, на каждом из этапов возведения выполняются работы по установке (удалению) отдельных конструктивных элементов или их групп, регулированию фактических размеров элементов несущих конструкций, введению (удалению) временных связей, изменению параметров связей системы с внешней средой и т. п. В основу технологии расчета, учитывающей указанные выше обстоятельства, положен принцип поэтапного отслеживания изменения основных параметров расчетной модели (геометрии, жесткостных параметров элементов модели и связей, нагружения и деформирования) с замыканием системы на каждом (заранее определенном) этапе возведения здания. При этом четко различается суммарное НДС системы, возникающее на каждом этапе монтажа с учетом всех предшествующих этапов, и приращение НДС, вызванное дополнительными воздействиями на систему, относящимися исключительно к рассматриваемому этапу монтажа.

При этом все расчеты выполняются в предположении справедливости обычных допущений линейной строительной механики для каждой стадии монтажа. Однако, в целом задача становится нелинейной за счет изменения расчетной схемы при переходе от одного этапа монтажа к другому.

## 2.8. Построение конечно-элементных моделей

### Сходимость МКЭ

В теории метода конечных элементов большое внимание уделяется проблеме сходимости, т. е. асимптотическому поведению оценок точности получаемого приближенного решения при неограниченном сгущении сетки конечных элементов. Установлен ряд важных теорем о сходимости, например, для совместных элементов определено [14, с. 195–196], что если (*k*–1) является степенью полинома, с помощью которого внутри конечных элементов аппроксимируется перемещение и решается эллиптическая краевая задача порядка 2*m*, для которой получено приближенное решение в перемещениях $\boldsymbol{u}_h$, то ошибка в энергии по сравнению с точным решением *u* составляет

$$\boldsymbol{U}(\boldsymbol{u}-\boldsymbol{u}_h, \boldsymbol{u}-\boldsymbol{u}_h) \le Ch^{2(k-m)}\|\mathbf{u}\|_k^2, \qquad (2.8.1)$$

где *h* — максимальное значение относительного размера элемента (шаг сетки).

Для *s*-х производных *z* имеем оценки ошибок:

$$\|\boldsymbol{u}-\boldsymbol{u}_h\|_s \le Ch^{k-s}\|\mathbf{u}\|_k, \quad \text{если } s > 2m-k; \qquad (2.8.2, a)$$

$$\|\boldsymbol{u} - \boldsymbol{u}_h\|_s \le Ch^{2(k-s)}\|\mathbf{u}\|_k, \quad \text{если } s \le 2m - k. \qquad (2.8.2, \textit{б})$$

Для несовместных элементов аналогичные оценки получены в серии работ И.Д. Евзерова и В.С. Карпиловского (см., например, [5, 8]).

Данные о значениях параметра сходимости дают возможность приблизительно назначить требуемую густоту сетки конечных элементов, исходя из такого весьма характерного рассуждения [2, с.55]: «...заметим лишь, что при естественных ограничениях на исходные данные и сетку области сходимость имеет место, и погрешность в определении напряжений и деформаций имеет порядок $Ch/L$, где через $C$ обозначена константа, зависящая от формы области; $h$ — шаг сетки; $L$ — характерный размер области. Эта оценка служит ориентиром при назначении шага сетки в зависимости от желаемой точности (*средней*), например, задав точность приближенного решения 5%, нужно выбрать шаг сетки равным примерно 1/20 от характерного размера...», т. е. для характерного двумерного пятна необходимо иметь около 400 узлов, а в трехмерной задаче — примерно 8000.

При этом следует помнить, что приведенное выше рассуждение справедливо *только в среднем* и, кроме того, точность очень зависит не только от типа конечного элемента (констант $C$ и $k$), но и от способа расположения конечных элементов и их ориентации по отношению к потокам основных напряжений. О последнем свидетельствует характерный пример, заимствованный из работы [7] и показанный на рис. 2.8-1.

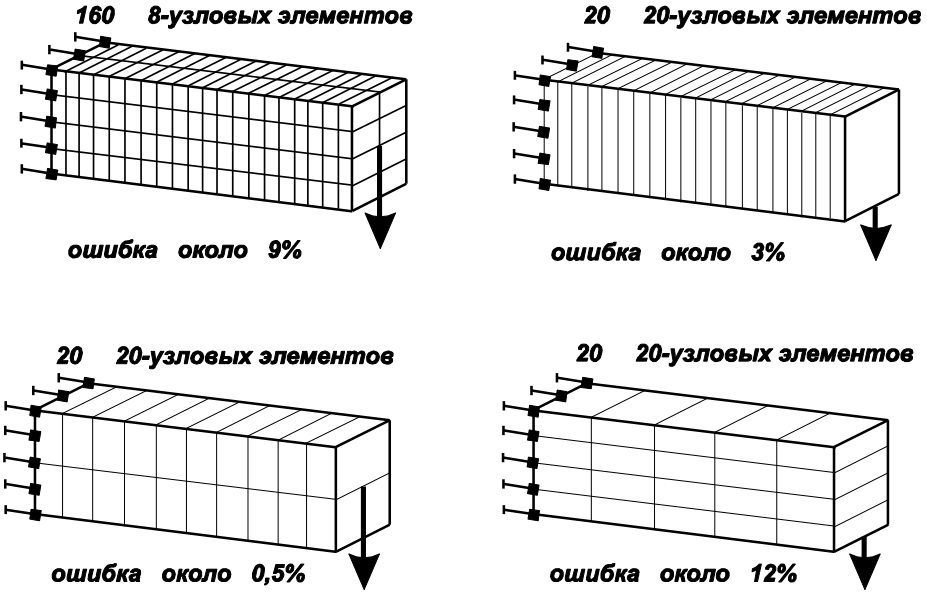



Рис. 2.8-1. *Различные схемы конечно-элементного разбиения и точность расчета*

Следует также учитывать, что упомянутые выше оценки скорости сходимости ориентированы на выяснение асимптотических свойств решения, а практического расчетчика интересует степень близости приближенного решения, полученного на вполне определенной сетке конечных элементов. Конечно, в большинстве случаев асимптотическая сходимость сопровождается и приемлемой «практической сходимостью», под которой мы будем понимать возможность получения приемлемой точности при сравнительно грубом разбиении, но из этого правила есть и исключения. Приведем в связи с этим высказывание великого математика и физика А. Пуанкаре (цитируется по [1, с.52]):

«...из двух рядов, коих общие члены суть $1000^n/n!$ и $n!/1000^n$, математики назовут первый сходящимся... потому что миллионный член гораздо меньше 999 999-го, второй же ряд они рассматривают как расходящийся, ибо его общий член может беспредельно возрастать. Астрономы, наоборот, примут первый ряд за расходящийся, потому что первые его 1000 членов идут возрастая; второй ряд они сочтут за сходящийся, потому что первые его 1000 членов идут убывая, и в начале убывание весьма быстрое». И далее совершенно головокружительный вывод: «Оба воззрения законны: первое — в исследованиях теоретических, второе — в численных приложениях».

По-видимому, при решении любой достаточно ответственной задачи нельзя обойтись без анализа качества решения, которое можно проверить путем повторного рассмотрения задачи на другой сетке элементов. Конечно, большую задачу вряд ли стоит решать целиком на сгущающихся сетках, но очевидно, что выполнение такого анализа для характерных фрагментов расчетной схемы является рациональным. Эмпирически установленный факт устойчивости результата при сгущении сетки является весьма убедительным доводом в пользу правильности выбранного подхода к решению.

Сказанное не следует трактовать как призыв к голому эмпиризму, теоретические исследования сходимости весьма важны и их результаты могут быть использованы в практических целях, однако здесь имеются и некоторые серьезные проблемы, которые расчетчик должен учитывать. Одна из них состоит в том, что при удовлетворительной практической сходимости по перемещениям могут не так хорошо сходиться интересующие расчетчика внутренние усилия или напряжения. Они определяются дифференцированием перемещений, а операция дифференцирования является некорректной в том смысле, что незначительному изменению функции может отвечать значительное изменение производной.

Таким образом, проверки практической сходимости должны быть ориентированы на исследование тех результатов, которые требуются в решаемой задаче. Вот, например, характерная цитата из известной монографии О. Зенкевича: «Размеры разбиения, необходимого для получения приемлемой точности в задачах теории оболочек, зависят от многих причин. Часто оказывается, что при малой толщине оболочки область действия изгибающих моментов ограничена краевой зоной, где происходит значительное изменение этих моментов. При этом мембранные силы вычисляются точно даже при очень грубом разбиении, но, чтобы уловить изменение моментов вблизи границ, требуется крайне мелкое разбиение». [6, с.257].

При этом имеется определенная трудность в сопоставлении напряжений, полученных на сетках разной густоты, которая связана с тем, что напряжения зачастую определяются в центрах конечных элементов и нужно приложить определенные усилия для того, чтобы иметь возможность сопоставить напряжения в одинаковых точках.

Кроме того, при использовании некоторых типов конечных элементов (например, треугольные элементы с линейной аппроксимацией перемещений для решения плоской задачи теории упругости), поля напряжений имеют вид кусочно-постоянных функций, причем область их постоянства совпадает с треугольниками сетки. Значения напряжений, определенные с использованием этих элементов, очень меняются при переходе от элемента к элементу, поэтому обычно применяется осреднение напряжений по элементам звезды, и относят их к узловой точке. Сопоставления таких полей напряжений затрудняется еще и наличием операции осреднения.

Организация проверки практической сходимости должна учитывать, что решаемая задача может иметь неприятные особенности, связанные с некорректной идеализацией конструкции. Типичным примером является идеализация нагрузки в виде сосредоточенной силы (практически нереализуемая ситуация), с которой могут быть связаны такие свойства решения задачи, как появление уходящих в бесконечность решений (логарифмическая особенность прогиба пластины под сосредоточенной силой) и высокие градиенты поля напряжений.

Таким образом, проверку практической сходимости стоит организовать на примерах близких к практически интересующему расчетчика классу задач, но таких, для которых имеются точные решения. Тогда интерпретация результатов тестирования оказывается более содержательной. Некоторые задачи такого рода рассмотрены ниже.

### Проверка сходимости для некоторых моделей

Были проведены сопоставительные расчеты шарнирно опертой квадратной пластинки, загруженной по всей площади равномерно распределенной нагрузкой. Расчеты выполнялись при четырех сетках конечных элементов — 4×4, 8×8, 16×16 и 24×24 (рис. 2.8-2).

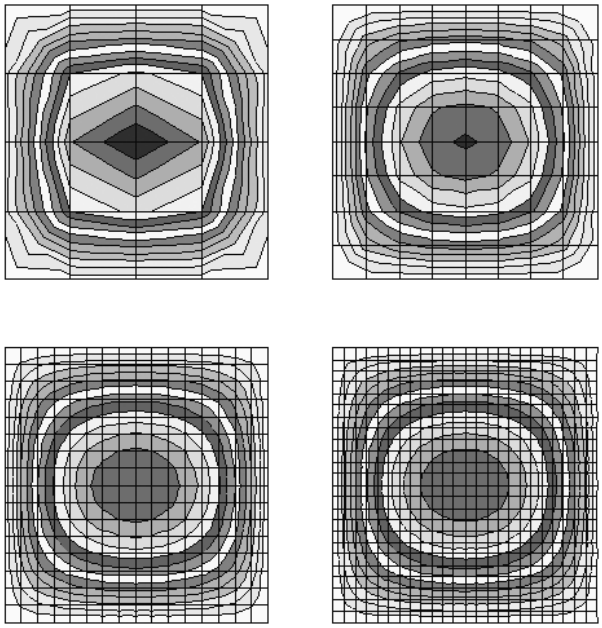


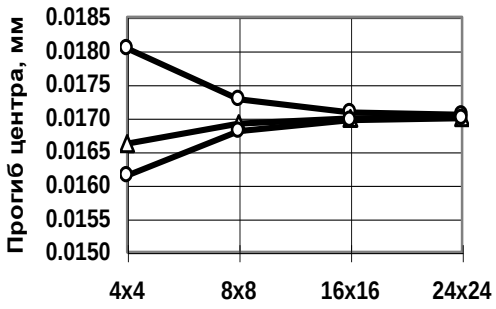
Рис. 2.8-2. *Изополя изгибающих моментов для расчетных схем с различными сетками конечных элементов*

**Таблица 2.8-1**

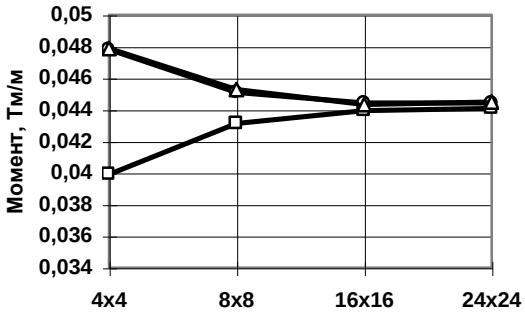
| | **Перемещения центра плиты при сетке** | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Тип КЭ** | **4x4** | **8x8** | **16x16** | **24x24** |
| 11/41 | 0,0180329 | 0,0172754 | 0,0170823 | 0,0170453 |
| 20/50 | 0,0166168 | 0,0169137 | 0,0169918 | 0,0170051 |
| 12/42 | 0,0161403 | 0,0168034 | 0,0169658 | 0,0169938 |
| | **Момент в центре плиты** | | | |
| M -11/41 | 0,04781 | 0,04509 | 0,04443 | 0,04443 |
| M -20/50 | 0,03991 | 0,04313 | 0,04393 | 0,04408 |
| M -12/42 | 0,04787 | 0,04528 | 0,04432 | 0,04448 |
| | **Поперечная сила на краю** | | | |
| Q -11/41 | 0,22 | 0,28 | 0,31 | 0,32 |
| Q -20/50 | 0,37 | 0,4 | 0,43 | 0,44 |
| Q -12/42 | 0,24 | 0,31 | 0,33 | 0,34 |

В табл. 2.8-1 приведены результаты по перемещениям, изгибающим моментам и поперечным силам для конечных элементов различного типа, полученные на упомянутых сетках. Эти же данные проиллюстрированы графиками на рис. 2.8-3.

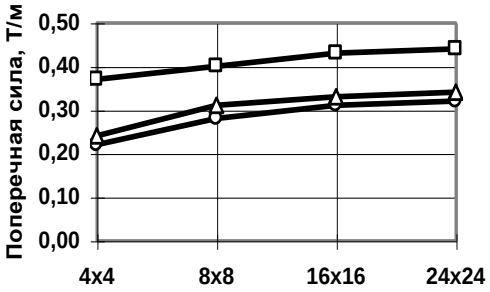
*а)*




*б)*




*в)*



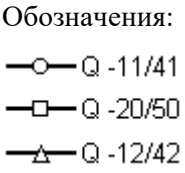




Рис. 2.8-3. *Сходимость результатов при равномерной нагрузке:*
*а* — по прогибам; *б* — по моментам;
*в* — по поперечным силам

Как видно из табл. 2.8-1 и рис. 2.8-3, практическая сходимость имеет место для прогибов и изгибающих моментов при использовании конечных элементов всех типов, а для поперечных сил элементы 11-го типа дают значения, заметно отличающиеся от величин, полученных с использованием других конечных элементов. Отметим, что элемент типа 20/50 присоединялся только к четырем узлам, хотя имеется возможность ввести узлы на его сторонах (всего до восьми узлов). Контрольные расчеты при такой схеме использования показали, что точность результатов существенно возрастает, и они приближаются к данным, получаемым на сетках вдвое большей густоты. Например, для сетки элементов 8x8 прогиб равнялся 0,01701, изгибающий момент — 0,0442 и поперечная сила — 0,278.

**Таблица 2.8-2**

| | **Перемещения центра плиты при сетке** | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Тип КЭ** | **4x4** | **8x8** | **16x16** | **24x24** |
| 11/41 | 0.511522 | 0.494164 | 0.488470 | 0.487183 |
| 20/50 | 0.466266 | 0.480460 | 0.484425 | 0.485222 |
| 12/42 | 0.432918 | 0.470046 | 0.481375 | 0.483493 |
| | **Момент в центре плиты** | | | |
| M -11/41 | 2.61566 | 3.27276 | 3.93364 | 4.32066 |
| M -20/50 | 2.31761 | 3.04494 | 3.72290 | 4.11309 |
| M -12/42 | 1.89259 | 2.52465 | 3.17713 | 3.56252 |
| | **Поперечная сила около центра** | | | |
| Q -11/41 | 7.26 | 14.58 | 29.18 | 43.77 |
| Q -20/50 | 6.50 | 13.31 | 26.81 | 40.26 |
| Q -12/42 | 11.37 | 25.59 | 53.21 | 80.42 |

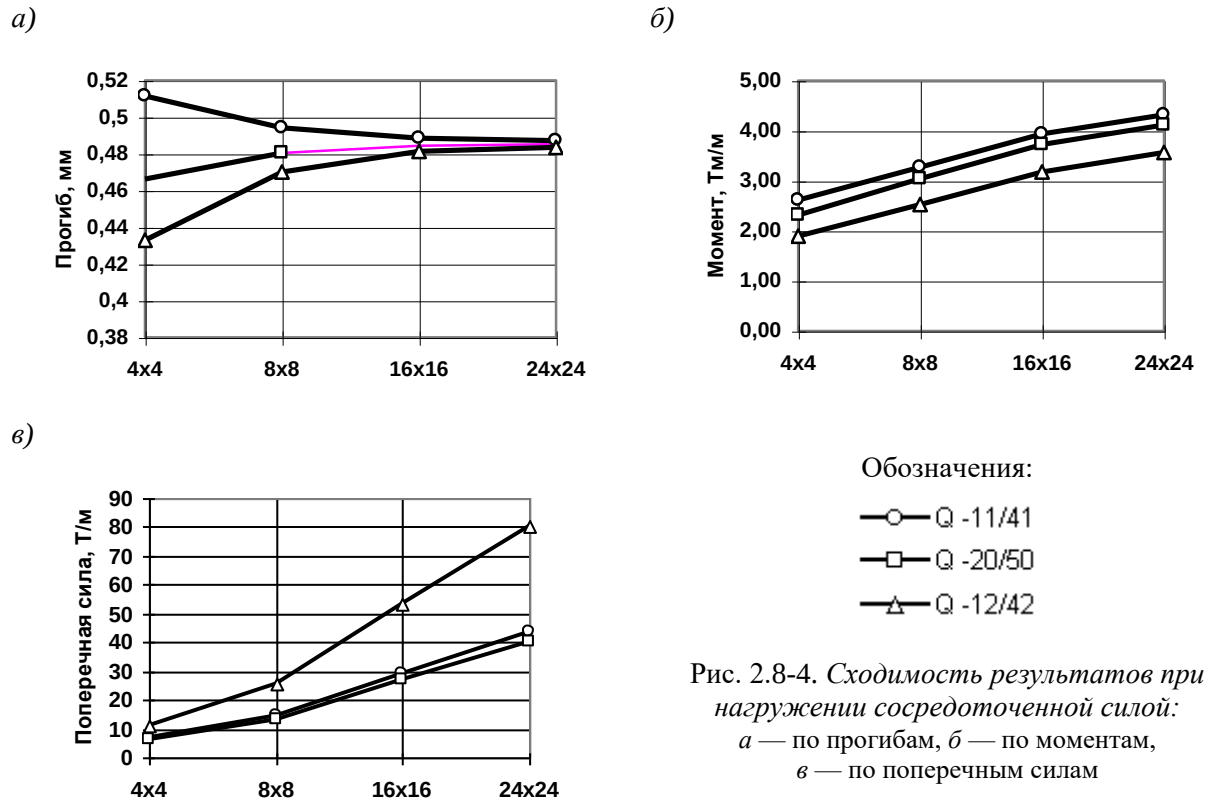



Рис. 2.8-4. *Сходимость результатов при нагружении сосредоточенной силой:*
*а* — по прогибам, *б* — по моментам,
*в* — по поперечным силам

В другой серии численных экспериментов, когда та же пластинка была загружена сосредоточенной силой, результаты, представленные в таблице 2.8-2 и на рис. 2.8-4, оказываются менее оптимистичными. Здесь замедляется скорость практической сходимости по моментам и еще более существенно — по поперечным силам, значения которых взяты в точке, расположенной на расстоянии четверти толщины от центра пластинки. По-видимому, для поперечных сил вообще не следует брать во внимание значения для точек, столь близко расположенных к месту приложения сосредоточенной нагрузки. Более детально этот вопрос анализируется ниже.

Следует отметить, что более быстрая сходимость результатов для некоторых типов конечных элементов достигается за счет заметного увеличения времени счета. Поэтому следует сопоставлять потери времени от использования этих элементов с потерями на решение задачи на более густой сетке при использовании элементов другого типа.

## Обход особых точек

Вблизи особых точек, таких, где имеется резкая концентрация напряжений, применение конечных элементов (равно как и других методов дискретизации) обычно затруднено, особенно в представлении поля напряжений. Приходится резко сгущать сетку конечных элементов и существенно увеличивать размер задачи.

Однако упомянутое сгущение сетки может и не привести к результату, что подталкивает к дополнительному анализу ситуации (см., например, рис. 2.8-4, *в*). Одним из наиболее распространенных суждений является следующее: сосредоточенная сила есть не существующая в природе абстракция, и если бы она была создана, то, проткнув конструкцию любой прочности и не встречая сопротивления, унеслась бы в бесконечность. Выходит, что эта идеализация создает искусственную трудность, в борьбе с которой можно совершать героические подвиги, но практическая значимость таких подвигов весьма относительна. Следовало бы помнить о том, каким образом фактически реализована в конструкции та сила, которая идеализируется в форме сосредоточенной, тогда могут отпасть и вопросы о сходимости конечно-элементного решения к точному (см., например, раздел «Стыковка элементов различной размерности» в этой главе).

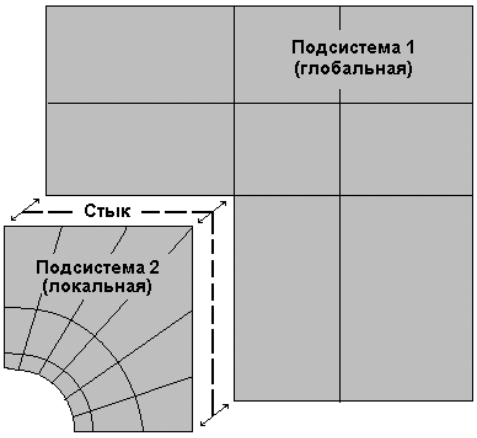
## Фрагментация

Если поведение решения вблизи особых точек все же представляет интерес, то возникает необходимость локального уточнения расчетной модели. Типичным примером может служить действие сосредоточенной силы на пластинку, когда в малой окрестности этой силы напряженное состояние является существенно пространственным, а обычные гипотезы теории пластин не выполняются. Возможен переход к трехмерной модели, однако полная замена пластинчатых конечных элементов трехмерными приведет к резкому возрастанию размеров задачи. Следовательно, необходимо комбинирование двухмерной идеализации объекта с уточнениями, выполненными в трех измерениях. Проще всего сделать это методом фрагментации, используя глобально-локальный анализ. Такой анализ, вообще говоря, можно выполнить в трех формах [22]: 1 — по методу сил, когда на выделенный фрагмент передаются усилия от остальной системы, найденные из глобального расчета; 2 — по методу перемещений, когда граница фрагмента смещается таким же образом, как и в глобальном расчете; 3 — смешанным методом. Мы приведем выкладки для первого из указанных подходов.

В упомянутом и других подобных случаях достаточно естественной представляется следующая двухэтапная процедура:

а) пренебрегая локальными особенностями конструктивного решения, строится загрубленная расчетная схема первого приближения, которая дает возможность оценить напряженно-деформированное состояние объекта в целом, и выполняется ее расчет;

б) выделяется фрагмент конструкции, содержащий интересующую нас особенность. К этому фрагменту прикладываются реакции, полученные при отбрасывании остальной части конструкции, и силы, непосредственно приложенные к выделенному фрагменту. Фрагмент рассчитывается с использованием более детальной расчетной схемы, и из полученного таким образом решения используется та часть, которая относится к точкам, расположенным на некотором удалении от границ фрагмента.




Такой подход согласуется с практикой выбора серии расчетных схем для анализа различных особенностей поведения конструкции. Однако он требует определенной интуиции и опыта для исключения опасности, связанной с наличием неустранимой погрешности решения загрубленной задачи.

При использовании метода фрагментации на стыке фрагмента с основной схемой может оказаться, что узлы фрагмента не имеют соответствующих им узлов по другую сторону стыка (рис. 2.8-5). Возможна и такая ситуация, когда возникает несовпадение сеток разбиения на двух- и трехмерных конечных элементах, расположенных по разные стороны стыка.

Рис. 2.8-5. *Конструкция стыка*

Таким образом, возникает проблема создания специальных конечных элементов для заполнения стыков на границе между фрагментом и остальной системой или использования других специальных приемов стыковки [23]. В комплексе **SCAD** роль таких элементов могут играть элементы типа 20, 30 и 50, у которых предусмотрена возможность расстановки узлов по сторонам четырехугольника. По-видимому, важную роль может сыграть оптимизация сглаживания сетки (постепенное изменение размеров ее элементов).

## Парирование изменяемости

В практических расчетах довольно часто случаются ошибки такого характера: расчетчик, прекрасно понимая, что схема работает по определенному закону деформирования (например, в одной плоскости) забывает, что системе сообщен другой признак типа схемы (например, пространственная система общего положения). Тогда конструкция оказывается изменяемой, и могут возникнуть некоторые неприятные явления. Типичным примером, где была допущена такая ошибка, является расчетная схема, изображенная на рис. 2.8-6, где представлена фундаментная

плита с примыкающими к ней стенами. Схема была геометрически изменяемой, и в ней были возможны смещения системы в целом как жесткого тела по направлениям осей X и Y.

Результаты расчета изменяемой системы показали ошибку контроля точности решения 99%. Это связано с тем, что, несмотря на то, что комплекс **SCAD** устраняет геометрическую изменяемость самостоятельно в процессе решения, такая процедура может привести к потере точности за счет неудачной стратегии устранения изменяемости. Лучше устранить изменяемость аккуратно. Так, в рассматриваемом случае следует запретить перемещения системы как жесткого целого, для чего рекомендуется использовать внешне статически определимую систему закреплений.

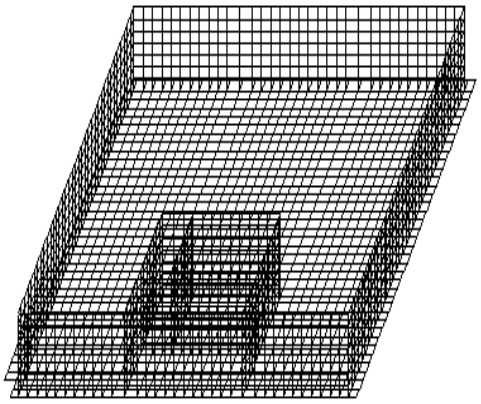


Рис. 2.8-6. *Расчетная схема*

После внесения этих изменений в расчетную схему никаких проблем с точностью решения не возникло.

Процедура наложения узловых связей с точки зрения техники ее выполнения несложна. Проблемой может стать рациональное назначение тех связей, необходимость учета которых связана с изменяемостью рассматриваемой расчетной схемы или ее фрагмента. Типичным примером может служить расчет плиты на упругом основании, которая вполне достаточно раскреплена из плоскости изгиба, но в плоскости может перемещаться как жесткое тело. Расчетчик понимает, что закрепление такой плиты в плоскости является необходимым, но не всегда верно выбирает удачный вариант такого раскрепления.

Во-первых, раскрепление желательно сконструировать таким образом, чтобы система была внешне статически определимой (в плоскости плиты следует расположить три связи). Если это удастся сделать, то реакции в дополнительно наложенных связях должны оказаться нулевыми из-за того, что отсутствуют нагрузки в плоскости плиты. Это рассуждение верно лишь теоретически, поскольку не учитывает неизбежную погрешность численного решения. Накопление ошибок округления приводит к тому, что вместо нулевой реакции мы получаем малые, но все же ненулевые значения реакций. Это свидетельствует о том, что в реальном численном представлении дело обстоит так, как если бы имела место некоторая небольшая ненулевая сила, действующая в плоскости плиты.

Поскольку упомянутая сила воспринимается условно наложенными связями, то значения полученных реакций оказываются зависящими от способа наложения связей. Если такие связи расположить по возможности далеко одна от другой (рис. 2.8-7, *а*), реакции окажутся малыми и не внесут заметного возмущения в напряженное состояние. Если же, например, закрепить плиту в одной точке (рис. 2.8-7, *б*) от двух смещений и поворота, что теоретически является возможным, возмущение может оказаться заметным, и результаты расчета в окрестности такого узла окажутся искаженными.

*а)* *б)*



Рис. 2.8-7. *Наложение связей, парирующих изменяемость:*
*а* — рекомендуемая схема; *б* — неудачное раскрепление

Все сказанное выше относится к любому случаю раскрепления свободного (имеющего свободу перемещений как жесткого тела) фрагмента системы.

## Стыковка элементов различной размерности

Лишь в редких случаях вся конструкция представлена элементами одинакового типа (например, только элементами плиты); чаще встречаются случаи, когда в одной расчетной модели присутствуют и стержневые, и оболочечные, и другие элементы.

Комплекс **SCAD** допускает почти произвольную комбинацию конечных элементов самых разнообразных типов, размерностей, размеров и геометрической формы, а также с различными числовыми характеристиками жесткости. Но эта программная гибкость таит в себе и опасности, иногда лежащие на поверхности, а иногда — скрытые и поэтому наиболее коварные. Такие ситуации возникают, например, при наличии в расчетной схеме одномерных (стержневых) и двумерных (плитных и/или оболочечных) элементов. Как будет показано ниже, такое объединение «разнокалиберных» элементов в общей расчетной схеме требует пристального внимания, в особенности — в местах соединения элементов различной размерности.

**Стержни + плиты**. В качестве примера комбинации плитных и стержневых элементов рассмотрим расчет пространственного стержневого каркаса совместно с плитным фундаментом.

Итак, рассмотрим дискретную расчетную схему, сочетающую в себе конечные элементы плиты и стержневые элементы, жестко присоединенные к плите (то, что плита расположена на упругом основании, не имеет значения для обсуждаемых здесь проблем). Сетка конечных элементов плиты выбирается так, чтобы стержни каркаса здания попадали в узлы сеточного разбиения плиты. Если не предпринимать никаких дополнительных мер, то описанная выше расчетная схема в узлах стыковки плитных и стержневых элементов обеспечит совместность как вертикальных перемещений плиты и каркаса (перемещений в направлении, перпендикулярном плоскости плиты), так и соответствующих углов поворота. Однако, получаемые в этой расчетной схеме изгибающие моменты в сечениях стоек, примыкающих к плите, не имеют отношения к истинному распределению внутренних усилий. А если это так, то это скажется и на распределении внутренних усилий в остальных элементах каркаса здания.

Действительно, представим себе, что сетка плиты сгущается и пользователь ожидает все большего уточнения результатов расчета. Однако, начиная с некоторой сеточной разбивки, дальнейшее дробление сетки приводит к уменьшению абсолютных значений изгибающих моментов в стержнях в местах их заделки в плиту. В пределе, при устремлении максимального размера сеточной ячейки к нулю эти изгибающие моменты также должны стремиться к нулю, а это означает, что данная расчетная схема обеспечивает не жесткое, а шарнирное присоединение элементов каркаса к плите. То, что пользователь формально при избранной им сетке получает некоторые отличные от нуля численные значения изгибающих моментов, свидетельствует лишь о погрешности дискретизации в методе конечных элементов, но нет же никаких оснований погрешность дискретизации принимать за достойный доверия результат!

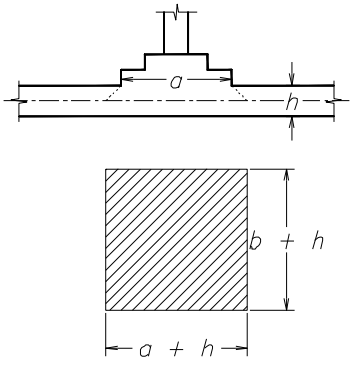



Рис. 2.8-8. *Присоединение стойки через подколонник; a и b — размеры подошвы подколонника в плане*

В самом деле, изгибающий момент в стержне в описанной выше расчетной схеме, вне зависимости от размеров сетки, передается на плиту как момент, сосредоточенный в узле сетки. Но плита под действием сосредоточенного изгибающего момента получает бесконечный угол поворота в месте его приложения. Таким образом, плита не оказывает сопротивления на сосредоточенный поворот, а значит, и не защемляет элементов каркаса.

Для того чтобы откорректировать расчетную схему, следует рассмотреть конструктивное решение в месте прикрепления каркаса к плите. Если стойки каркаса присоединены к плите с помощью подколонников, то последние могут рассматриваться, например, как абсолютно жесткое тело, не меняющее своих размеров при любых изменениях сетки конечных элементов плиты.

Размеры же самого жесткого тела можно назначить, исходя из размеров подколонника ($a \times b$) с учетом распределения давления от него на плиту под углом 45° (рис. 2.8-8) до срединной

поверхности плиты, что вполне отвечает традиционной инженерной практике. Эту ситуацию можно также смоделировать введением стержневой «подставки» (типа елочного крестика) из элементов достаточно большой жесткости.

В этой схеме сосредоточенный момент от стоек каркаса передается на плиту через жесткую шайбу, размеры которой $a+h$ и $b+h$ не связаны с размерами сетки конечных элементов, а значит, и с погрешностью дискретизации. Хотя погрешность дискретизации и будет влиять на численные значения изгибающих моментов в стойках, она не окажет такого катастрофического воздействия на отклонение расчетной схемы от реальной конструкции, как это было в исходной постановке задачи без введения в расчетную схему жесткого тела. В том случае, когда подколонники отсутствуют, можно в качестве размеров жесткого тела принять размеры поперечного сечения стойки с учетом 45-градусного распределения давления на плиту, как это показано на рис. 2.8-8.

Наконец, обратим внимание еще на одно обстоятельство, связанное с совместным расчетом пространственного каркаса и фундаментной плиты. Предполагая, что стойки каркаса ортогональны плоскости плиты, получим, что плита не оказывает сопротивления закручиванию стоек, а также смещениям v, w низа стоек в направлении осей Y, Z соответственно, поскольку у конечных элементов плиты просто нет соответствующих степеней свободы для сопротивления этим линейным перемещениям и закручиванию.

Если иных внешних горизонтальных связей (лежащих в плоскости Y, Z) расчетная схема не содержит, то механическая система окажется незакрепленной и геометрически изменяемой, так что программа вынуждена будет отреагировать на это обстоятельство.

Заметим, что для пространственного каркаса это не приводит к геометрической изменяемости системы, а у программы может и не быть механизмов обнаружения ошибок подобного рода. Это обстоятельство также необходимо иметь в виду при формировании расчетной схемы объединенной конструкции.

**Стержни + балки-стенки**. При расчете на горизонтальные нагрузки зданий повышенной этажности, содержащих в составе несущих конструкций как стержневой каркас, так и диафрагмы жесткости, в расчетную схему естественным образом входят разнородные элементы.

Если к формированию дискретной расчетной схемы подходить совершенно формально, описывая пластину совокупностью конечных элементов плоского напряженного состояния, а стержневой каркас одномерными элементами, и не предпринимать каких-либо дополнительных мер, то в ригелях, примыкающих к узлам сопряжения каркаса с диафрагмой, как изгибающие моменты, так и продольные и поперечные силы будут получаться какими угодно, но только не имеющими отношения к действительности.

Если для диафрагмы используются простейшие конечные элементы с двумя степенями свободы в узле (линейные перемещения u и v в двух взаимно ортогональных направлениях); тогда эти конечные элементы не окажут сопротивления повороту примыкающего к ним узла, поскольку у них (у элементов) просто отсутствуют соответствующие степени свободы, и, таким образом, эти конечные элементы не передадут на примыкающие узлы каких-либо моментных усилий. Поскольку расчетная программа потребует формального выполнения всех условий равновесия, в том числе и равновесия каждого из узлов по моментам, то отсюда примыкающие жестко к этим узлам ригели обязаны будут передать на узлы строго нулевые моменты. В результате изгибающие моменты в ригелях в этих узлах окажутся равными нулю, что соответствует расчетной схеме с шарнирным присоединением ригелей к диафрагме и не будет отвечать замыслу пользователя, сориентированного на защемление ригелей в диафрагме.

Каким же образом откорректировать исходную механическую модель или, что то же самое, математическую постановку задачи, позволяющую адекватно отобразить работу реальной конструкции? Как уже было сказано выше, для этого нужно детальнее рассмотреть конструктивные особенности сопряжения стержня и диафрагмы.

Пусть, например, стальной ригель двутаврового сечения заведен на части своей длины в кирпичную стену, как это показано на рис. 2.8-9, *а*. Тогда в расчетной схеме, в том числе и в дискретном ее аналоге, достаточно учесть проникающий на соответствующую длину в область плоской задачи одномерный элемент-стержень, как это показано на рис. 2.8-9, *b*.

Иной вариант расчетной схемы можно предложить в случае монолитного сопряжения железобетонной стеновой панели и ригеля каркаса здания — рис. 2.8-10, *a*. Здесь можно учесть фактические размеры сечения — высоту ригеля, на протяжении которой вдоль границы стены уместно разместить абсолютно жесткое тело, как это показано на рис. 2.8-10, *b*. Это абсолютно жесткое тело для самого ригеля корреспондируется с гипотезой плоских сечений, согласно которой сечение ригеля остается после его деформации плоским и не изменяет своих размеров.

Разумеется, приведенные здесь два варианта формирования расчетных схем не исчерпывают всего многообразия возможных ситуаций, так что в каждом конкретном случае расчетчик должен исходить из конструктивных особенностей задачи, а не из неких заранее выдуманных, условных и подходящих на все случаи жизни схем.

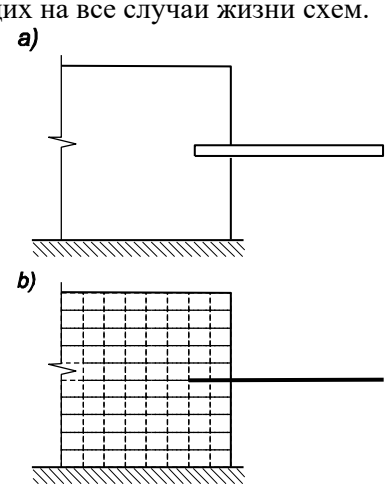



Рис. 2.8-9. *Заделка консоли в стенку*

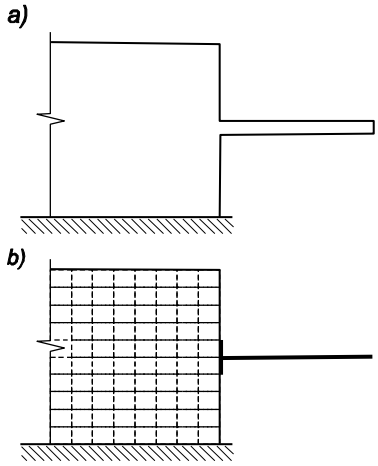



Рис. 2.8-10. *Монолитное сопряжение*

Прием «разноса области примыкания» по типу рис. 2.8-9 может использоваться и в других случаях сопряжения элементов различной размерности. На рис. 2.8-11 показан пример такого сопряжения, в котором цилиндрическая оболочка стенки и сферическая оболочка крышки защитной конструкции атомного реактора сопрягается с массивным кольцом. Необходимо заметить, что в месте взаимопроникновения конструкций появляется некоторое возмущение жесткостных параметров за счет суммирования жесткостей оболочки и трехмерного тела в тех частях, которые занимают одно и то же положение в пространстве. Это следует учесть при назначении величин жесткости.

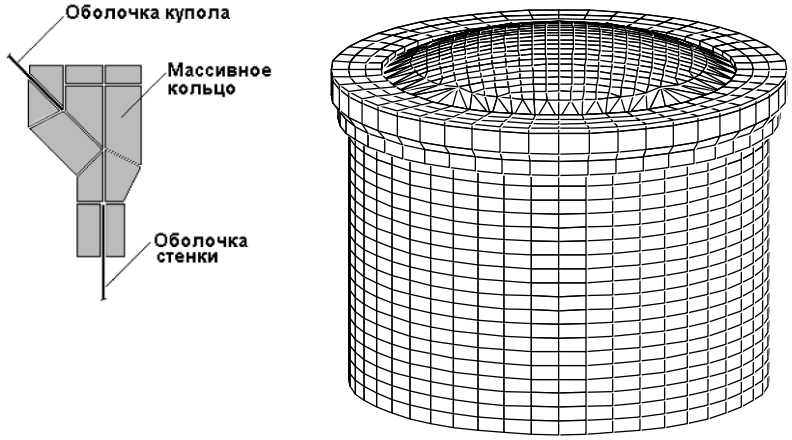



Рис. 2.8-11. *Сопряжение стенки и крышки защитной оболочки реактора с массивным кольцом*

## Эффекты объединения перемещений

Стеснение свободы узловых перемещений в форме объединения перемещений, т. е. принудительного навязывания значений перемещений одного узла другому, используется чаще всего для того, чтобы промоделировать пренебрежение некоторыми деформациями системы. Так, например, если объединить горизонтальные перемещения узлов в местах примыкания ригеля к колоннам одноэтажной рамы, то это будет эквивалентно использованию гипотезы об абсолютной жесткости ригеля по отношению к деформациям растяжения-сжатия.

Для многоэтажного каркаса часто можно пренебречь податливостью перекрытий, считая их абсолютно жесткими дисками. Если в такой схеме объединить горизонтальные компоненты перемещений всех узлов каждого перекрытия, то идея абсолютно жесткого диска будет реализована. Однако следует обратить внимание на то, что при этом окажутся невозможными и закручивания перекрытий, которые смогут получать только поступательные перемещения. Такой эффект может оказаться неприятной неожиданностью для расчетчика, особенно при расчете здания несимметричной структуры.




Рис. 2.8-12. *Фрагмент расчетной схемы плиты*

Полезно обратить внимание еще на один вариант ошибки. В одной из практических задач (рис. 2.8-12) оказалось, что по результатам расчета плиты в ядре жесткости по направлению оси симметрии (Y) отсутствуют поперечные силы, а в другом направлении (вдоль оси X) они есть. Сам факт наличия ядра жесткости моделировался путем объединения перемещений в узлах примыкания ядра жесткости к плите, при этом объединялись перемещения по Z (прогибы плиты) и углы поворота $U_X$, $U_Y$.

Такой результат объясняется часто повторяющейся ошибкой — не учитывается разница между наложением связи (запретом перемещения) и объединением перемещений различных узлов. При объединенных перемещениях Z соответствующая часть плиты может перемещаться только горизонтально и создается впечатление, что и все углы поворота будут отсутствовать.

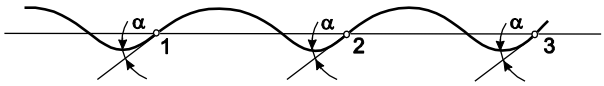



Рис. 2.8-13. *Объединение углов поворота*

Однако даже их объединение не может гарантировать равенство углов поворота нулю. Это иллюстрируется простой схемой (рис. 2.8-13), где узлы 1, 2, 3 … имеют одинаковое перемещение **и одинаковые, но не равные нулю** углы поворота.

В задаче по рис. 2.8-12 более правильным было бы задать в зоне расположения ядра жесткости связи, запрещающие повороты $U_X$ и $U_Y$, и объединить перемещения Z.

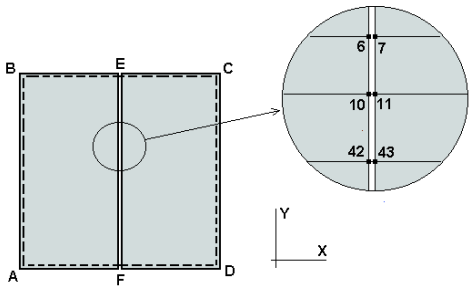



Рис. 2.8-14. *Плита с цилиндрическим шарниром*

Возможность объединения не всех, а только части перемещений может использоваться для формирования некоторых специальных типов граничных условий в конструкциях нестержневого типа, для которых, в отличие от стержневых систем, не могут быть описаны «неполные» присоединения к узлам (шарниры).

Так, например, если возникает необходимость описать конструкцию опертой по контуру плиты ABCD, две половины которой шарнирно соединены по линии EF (рис. 2.8-14), то для этого достаточно, чтобы вдоль этой линии имелось две системы узлов (…, 6, 10, 42, … и …, 7, 11, 43, …), к которым примыкают левая (ABEF) и правая (FECD) половины конструкции, и для смежных пар узлов объединить все перемещения, кроме поворота вокруг оси Y.

## Использование законтурных элементов упругого основания

При расчете конструкций на упругом основании возникают проблемы учета распределительных свойств основания, которые игнорируются в простейшем случае винклерова основания (клавишная модель). Большинство реальных грунтов обладают распределительной способностью, когда, в отличие от винклеровой расчетной схемы, в работу вовлекаются не только непосредственно нагруженные части основания. Следовательно, для учета распределительной способности основания необходимо, во-первых, использовать отличные от винклеровой модели основания, во-вторых, ввести в расчетную схему те части основания, которые расположены за пределом фундаментной конструкции.

Учет части основания, расположенной за областью Ω, занимаемой самой конструкцией, в **SCAD** может выполняться с использованием «бесконечных» конечных элементов [15] типа клина или полосы. Эти элементы позволяют смоделировать все окружение области Ω, если она является выпуклой и многоугольной (рис. 2.8-15).

Многоугольность области практически всегда обеспечивается с той или иной степенью точности. Если же область Ω является невыпуклой или неодносвязной, она должна быть дополнена до выпуклой области конечными элементами ограниченных размеров. При этом в дополняемых частях толщина плиты принимается равной нулю.

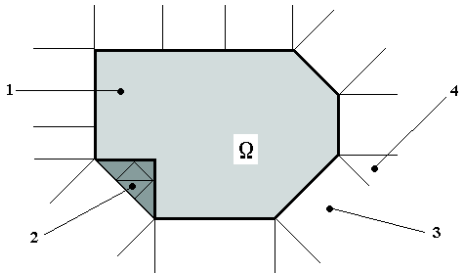



Рис. 2.8-15. *Расположение законтурных конечных элементов типа клина и полосы*

1 — *плита*; 2 — *дополнение области* Ω *до выпуклой*; 3 — *элемент-полоса*; 4 — *элемент-клин*.

Использование только имеющихся конечных элементов на упругом основании (стержней, плит, оболочек) и специальных законтурных элементов не позволяет создать произвольную расчетную схему конструкции, расположенной на упругом основании. В частности, могут возникнуть сложности, например, при попытке построить расчетную модель плотины, работающей в условиях плоской деформации, поскольку элементов типа балки-стенки на упругом основании комплекс **SCAD** не имеет.

Проблема решается очень просто путем включения между контуром плотины и грунтом элементов стержневого типа на упругом основании. При этом жесткость такого стержня может быть задана нулевой. Аналогично можно «подстелить» плиту с нулевой жесткостью на упругом основании под массивную часть расчетной модели.

В случае, если для определения коэффициентов постели использовалась программа **Кросс**, законтурные элементы плиты не вводятся. Это связано с тем, что внутри программы **Кросс** решается задача для неограниченной в плане области, и результаты решения такой задачи нашли свое отражение в значениях и законе распределения коэффициентов постели.

## Использование бесконечно жестких вставок

Широко известно, что плохо обусловленные матрицы жесткости часто появляются в тех случаях, когда в одном узле конечно-элементной модели сопрягаются элементы с резко отличными жесткостными параметрами. Покажем на простом примере, как можно интерпретировать такую ситуацию в терминах механики. Оказывается, что плохая обусловленность присуща «*почти изменяемым*» конструкциям.

На рис. 2.8-16 представлена формально неизменяемая система, матрица жесткости которой имеет вид

$$\mathbf{K} = k\begin{pmatrix} 1+\alpha & -1 \\ -1 & 1+\alpha \end{pmatrix}. \qquad (2.8.1)$$

Собственные числа этой матрицы $\lambda_1 = \alpha$; $\lambda_2 = 2 + \alpha$, а число обусловленности

$$H = \lambda_2/\lambda_1 = 1 + 2/\alpha\ .$$

При большой жесткости средней пружины по сравнению с жесткостью крайних пружин параметр $\alpha$ мал, и число $H$ становится большим, что говорит о плохой обусловленности и возможной потере точности при решении уравнений с такой матрицей.

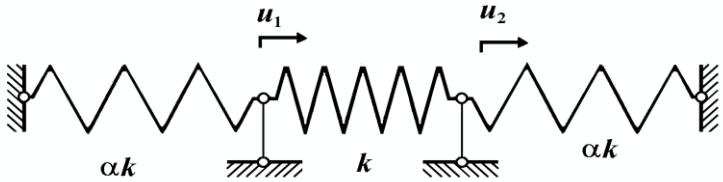



Рис. 2.8-16. *Схема с плохо обусловленной матрицей жесткости*

Нетрудно заметить, что механическое поведение рассматриваемой конструкции приближается к поведению изменяемой системы. Действительно, возможно перемещение средней пружинки как жесткого тела при пренебрежимо малом сопротивлении крайних пружинок. Их реакция ввиду приведенного соотношения жесткостей вызывает ничтожную деформацию средней компоненты системы. Если же изменить соотношение жесткостей на обратное, то матрица жесткости будет иметь число обусловленности $H \approx 1$. В узле снова сходятся элементы с резко отличными жесткостями, но матрица жесткости хорошо обусловлена и соответствует теперь упругой конструкции (средней пружинке), присоединенной к земле практически недеформируемыми связями. Стоит заметить, что отыскание «почти изменяемости», основанной на сопоставлении порядков возможных деформаций, может свидетельствовать как о некотором пороке конструкции, так и о порочности ее моделирования.

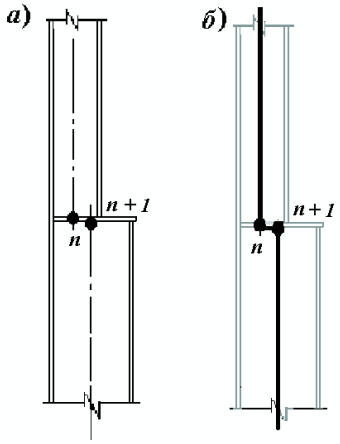



Рис. 2.8-17. *Ступенчатый стык*

Не останавливаясь на анализе первого случая, когда, по-видимому, конструктор должен изменить систему, заметим, что для второго случая часто удается найти достаточно простой выход из положения, когда элемент с резко завышенной жесткостью объявляется абсолютно жестким, и это свойство учитывается на уровне составления системы разрешающих уравнений путем введения соответствующих связей.

Так, например, при расчете стержневых систем часто возникает необходимость учесть эксцентричность стыковки элементов в узлах (рис. 2.8-17, *а*).

Вставка между узлами $n$ и $n$+1 стержня с очень большой, но конечной жесткостью, как это представляется интуитивно возможным, приводит, как это было показано выше, к резкой потере точности вычислений за счет ухудшения обусловленности матрицы жесткости.

Для обхода этой вычислительной трудности предусматривается возможность использовать *бесконечно жесткие вставки* по концам стержневых элементов. Тогда расчетная схема имеет

только один узел, занимающий произвольное положение на прямой между узлом *n* и узлом *n*+1, и концевые сечения соседних элементов присоединяются к этому узлу через жесткие вставки. Потеря точности в этом случае не наблюдается.

Проще всего можно поступить, если этот единственный узел N совместить с узлом *n* или *n*+1, тогда абсолютно жесткая вставка появится только у одного из элементов. Платой за это упрощение является то, что внутренние усилия будут определены лишь на упругой части стержня.

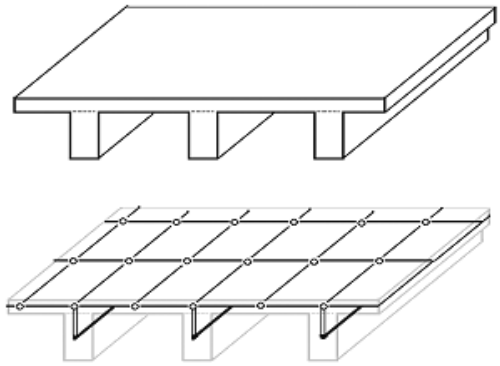


Рис. 2.8-18. *Ребристая плита*

Использование абсолютно жестких вставок широко практикуется в тех случаях, когда рассматривается плита или оболочка, подкрепленная ребрами, эксцентрично расположенными по отношению к срединной поверхности. Если эти ребра моделируются стержневыми элементами, то учесть эксцентриситет легко и удобно, используя абсолютно жесткие вставки (рис. 2.8-19). При этом расчетные узлы располагаются на уровне срединной поверхности плиты. Можно, однако, расположить узлы на уровне центров тяжести ребер и воспользоваться опцией «смещение срединной плоскости пластин», что приведет к такому же эффекту. Такой прием удобен, например, в тех случаях, когда проектируется балочная клетка, часть которой перекрывается настилом. Необходимо отметить, что эксцентричность расположения ребер сказывается на результатах, относящихся к мембранной группе усилий, поэтому учет эксцентриситета в конструкции чисто изгибаемого типа (и набранной из соответствующих конечных элементов) ничего не дает.

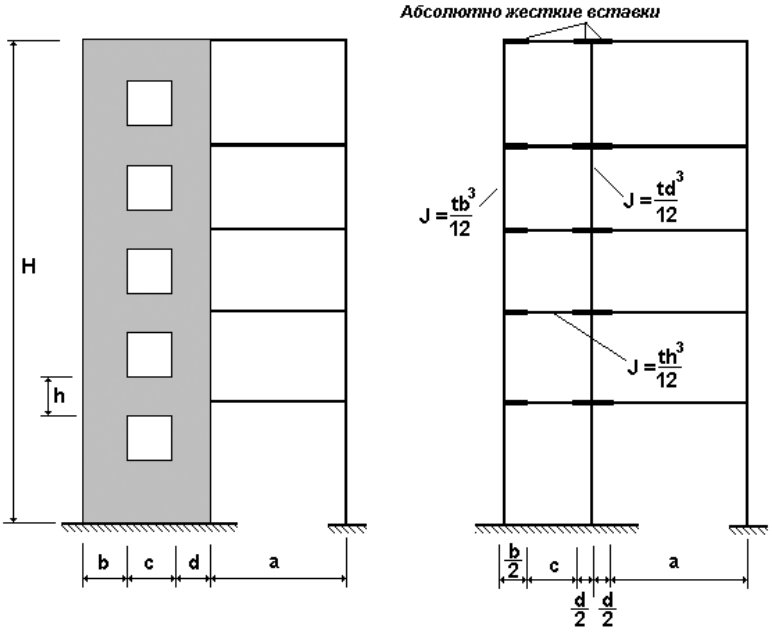



Рис. 2.8-19. *Использование абсолютно жестких вставок для учета размеров узлов*

При расчете стержневых систем высота сечения обычно не превышает 1/8÷1/10 расстояния между узлами. Но встречаются конструкции, когда это отношение доходит до 1/5 или даже 1/3 (некоторые виды фундаментов под турбоагрегаты, диафрагмы зданий, гидротехнические

сооружения и др.). В этом случае стержневая расчетная схема с точечными узлами, расположенными на пересечениях осей элементов, становится некорректной. Широко распространено предложение учитывать при этом реальные размеры «узлов», используя для этих целей стержневые элементы с бесконечно жесткими вставками. Пример такой схемы, построенной в соответствии с рекомендациями [3], дан на рис. 2.8-19.

Этот прием настолько давно используется, что расчетчики практически никогда не задают вопрос о правомерности использования гипотезы недеформируемости «узла». Вместе с тем он далеко не лишен смысла, что видно из рассмотрения результатов расчета модельной задачи (рис. 2.8-20).

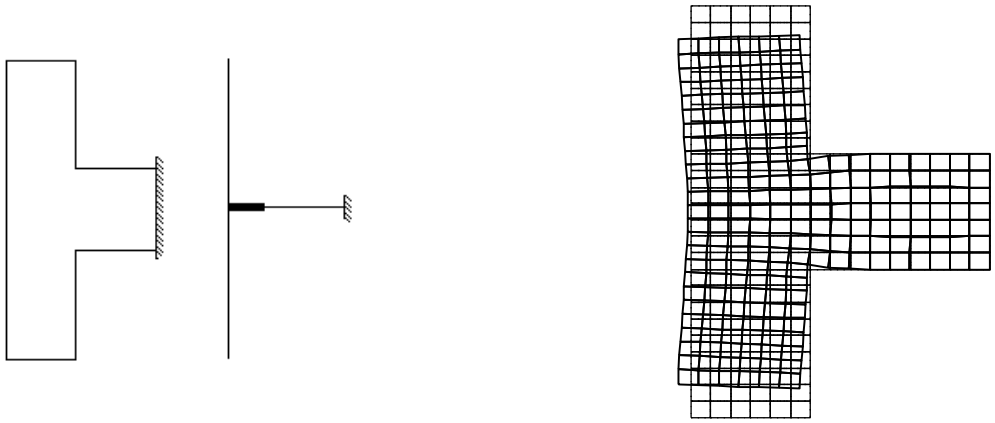


Рис. 2.8-20. *К анализу работы узла конечных размеров*

В ее стержневой модели горизонтальные перемещения отсутствуют, и вертикальный стержень не изгибается. Более детальная расчетная схема указывает на наличие горизонтальных перемещений, которые возникают вследствие стеснения деформаций сжатия по линии сопряжения АБ. Поскольку на противоположной стороне «стойки» этого стеснения нет, то возникает неравномерность распределения напряжений, эквивалентная изгибу.

## 2.9. Литература к главе Теоретические Основы


1. Блехман И.И., Мышкис А.Д., Пановко Я.Г., Механика и прикладная математика: Логика и особенности приложения математики.— М.:Наука, 1983.— 328 с.
2. Вовкушевский А.В., Шойхет Б.А., Расчет массивных гидротехнических сооружений с учетом раскрытия швов.— М.: Энергия, 1981. — 136 с.
3. Городецкий А.С., Евзеров И.Д., Стрелец-Стрелецкий Е.Б., Боговис В.Е., Гензерский Ю.В., Городецкий Д.А., Метод конечных элементов: теория и численная реализация. Программный комплекс "Лира-Windows" — Киев: ФАКТ, 1997.
4. Динамический расчет зданий и сооружений. (Справочник проектировщика).— М.: Стройиздат, 1984.— 303 с.
5. Евзеров И.Д., Оценки погрешности несовместных конечных элементов плиты. Деп. в УкрНИИНТИ, №1467 — Киев, 1979. — 9 с.
6. Зенкевич О., Метод конечных элементов в технике.— М.: Мир, 1975.— 542 с.
7. Каплун А.Б., Морозов Е.М., Олферьева М.А., ANSYS в руках инженера. Практическое руководство.— М.: УРСС, 2003. — 272 с.
8. Карпиловский В.С., Методы конструирования конечных элементов. Деп. в УкрНИИНТИ, №3153.— Киев, 1980. — 20 с.
9. Медведева Н.М., Микитаренко М.А., Перельмутер А.В., Статический и динамический расчет мачт на ЭВМ. // Сопротивление материалов и теория сооружений — Вып.48 — Киев:Будівельник, 1986. — С.79 – 82.
10. Перельмутер А.В., Сливкер В.И., Особенности алгоритмизации метода перемещений при учете дополнительных связей // Метод конечных элементов и строительная механика: Тр.ЛПИ — №349 — Л.: 1976. — С.28–36.
11. Перельмутер А.В.,Сливкер В.И., Расчетные модели сооружений и возможности их анализа. — М, Изд-во ДМК-Пресс, 2007. — 600 с.

12. Розин Л.А., Стержневые системы как системы конечных элементов — Л.: Изд-во Ленинградского ун-та, 1975. — 237 с.
13. Смирнов А.Ф., Статическая и динамическая устойчивость сооружений — М.: Трансжелдориздат, 1947.
14. Стренг Г., Фикс Дж., Теория метода конечных элементов — М.: Мир, 1977.— 349 с.
15. Феодосьев В.И., Десять лекций-бесед по сопротивлению материалов — М.: Наука, 1975.— 174 с.
16. Фиалко С.Ю., Прямые методы решения систем линейных уравнений в современных МКЭ-комплексах — М.: Изд-во СКАД СОФТ, Изд-во Ассоциации строительных вузов (АСВ), 2009. — 160 с.
17. Фиалко С.Ю., Реализация в программном комплексе SCAD блочного метода Ланцоша со сдвигами применительно к сейсмическому анализу конструкций // CADмастер, 2007, №40/5
18. A. Billionnet, On interval graphs and matrice profiles, Revue française d'automatique, d'informatique et de recherche opérationnelle. Recherche opérationnelle, 1986, **20**, No. 3, 245–256.
19. Fialko S., PARFES: A method for solving finite element linear equations on multi-core computers // Advances in Engineering Software, 2010, Vol. 41, Issue 12 — P.1256-1265.
20. Makiett R.N., Marcal P.V., Finite Element Analysis of Nonlinear Structures // Journal Structural Division. — Proc./ASCE, 1968.—Vol. 94.—No ST9.— P.2081–2105.
21. J.T. Oden, Finite Elements of Nonlinear Continua.— New York: McGraw Hill Book Company, 1972.
22. D. Sabahi, T. Rose, Special Applications of Global-Local Analysis, MSC/NASTRAN 1992 World Users` Conference Proceedings.
23. J.E. Schiermeier, J.M. Housner, J.B. Ranson, M.A. Aminpour, W.J. Stroud. The Application of Interface Element to Dissimilar Meshes in Global/Local Analysis, MSC 1996 World Users` Conference Proceedings
24. Timoshenko S.P., Theory of elastic stability.— New York: McGraw Hill Book Company, 1961.
25. M. Yannanakis. Computing the minimum fill-in is NP-complete. SIAM Journal of Algebraic and Discrete Methods, 1981., **2**, No. 1, 77–79.
26. C.H. Papadimitriou. The NP-completeness of the bandwidth minimization problem, Computing, 1976, **16**, No. 3, 263–270.

# 3. Библиотека конечных элементов

## 3.1. Общие вопросы

В методе конечных элементов занимаемая конструкцией сплошная область $\Omega$, которая имеет бесконечное число степеней свободы, аппроксимируется дискретной моделью, состоящей из совокупности подобластей (конечных элементов), имеющих конечное число степеней свободы и взаимодействующих между собой только в узловых точках.

Каждый конечный элемент (**КЭ**) $\Omega_e$ ($e = 1,\ldots, m$) характеризуется следующими свойствами:

- размерностью используемого пространства (одномерное, двумерное, трехмерное);
- геометрической формой, которая чаще всего является одной из простейших геометрических фигур (отрезок прямой, треугольник, прямоугольник, четырехугольник, тетраэдр и т. п.);
- набором узлов, располагаемых (как правило, хотя и не всегда) на линиях (поверхностях) раздела элементов и являющихся общими для граничащих друг с другом элементов;
- набором используемых степеней свободы, отнесенных чаще всего к узлам (хотя и не обязательно к узлам) — перемещения, повороты и т. п.;
- правилами, определяющими зависимость между перемещениями узлов конечного элемента и узлами системы. Узлы элемента, например, могут быть прикреплены к узлам системы жестко или шарнирно;
- системой аппроксимирующих функций, определенных внутри области $\Omega_e$ и позволяющих приближенно выразить компоненты перемещений в любой точке элемента через его степени свободы;
- физическим законом, определяющим зависимость между внутренними усилиями и перемещениями;
- классом задач, к которым применим данный тип конечного элемента (КЭ пластины плоского напряженного состояния, КЭ плиты Кирхгофа-Лява, КЭ покоящейся на упругом двухпараметровом основании плиты Рейсснера, стержень Тимошенко для пространственной задачи и т. д.);
- набором допустимых нагрузок и воздействий, которые могут быть приложены непосредственно к конечному элементу, и способом их задания;
- и последним (по списку, но не по значимости!) — перечнем ограничений и рекомендаций по применению.

Одной из важнейших характеристик конечно-элементной модели является максимальный диаметр элементов

$$h = \max_e \left( \sup_{x,y\in\Omega_e} |x-y| \right),$$

с которым часто связывают оценки погрешности метода. Иначе говоря, $h$ — это минимальный диаметр шара, в который можно вложить любой конечный элемент расчетной схемы. Кроме того, обычно предполагается, что при бесконечном уменьшении диаметра, т. е. при $h \to 0$, соблюдаются следующие условия регулярности — в каждый конечный элемент можно вложить шар радиуса $\rho \geq Ch$, где константа $C$ не зависит от $h$. Это предохраняет от использования так называемых "*игольчатых*" элементов (слишком вытянутых прямоугольников, треугольников с очень малыми углами и т. п.).

Как правило, в методе конечных элементов (МКЭ) аппроксимирующие функции являются полиномиальными или кусочно-полиномиальными (метод подобластей), хотя и существуют элементы с дробно-рациональными (так называемые изопараметрические элементы), тригонометрическими, логарифмическими и другими аппроксимациями поля перемещений. Выбор степеней свободы элемента и соответствующих аппроксимирующих функций полностью определяет скорость сходимости и оценку погрешности МКЭ.

Если зафиксировать все параметры конечно-элементной расчетной модели, за исключением размера конечных элементов $h$, то можно представить, что, меняя этот размер, мы получим

последовательность приближенных решений задачи $\boldsymbol{u}_h$. Когда говорят о сходимости МКЭ, то имеют в виду, что эта последовательность устремляется к точному решению задачи $\boldsymbol{u}^*$, когда $h \to 0$.

Представленная выше концепция конечно-элементного моделирования задачи базируется на том, что известно в литературе как применение *h-элементов*. Относительная простота такого представления допускает эффективное и прямое решение задачи расчета. В последние годы в некоторых программных системах (например, системы NASTRAN или StressCheck) получил признание иной тип конечного элемента — так называемый *p-элемент*. В отличие от *h*-элементов, *p*-элементы могут непосредственно представлять кривизну поверхности и особенности полей напряжений на более простых сетках, содержащих меньшее число элементов. Точность анализа управляется *p*-уровнем (порядком полинома), присвоенным каждому элементу: выше *p*-уровень — больше точность. При использовании *h*-элементов точность результата, как и время решения, возрастает за счет увеличения количества элементов. При использовании *p*-элементов тот же феномен происходит при повышении «порядка *p*».

Несмотря на многие положительные характеристики *p*-элементов, *h*-элементы имеют ряд преимуществ. Для анализа глобального поведения конструкции *h*-элементы могут оказаться предпочтительней. Они также лучше представляют решение для задач, в которых есть разрывы напряжений, как, например, в оребренных пластинах, а также при решении нелинейных задач. Наконец, *h*-элементы связаны с детально отработанной вычислительной технологией, проверенной временем. Именно исходя из таких соображений библиотека конечных элементов **SCAD** представлена только *h*-элементами.

## 3.2. Состав библиотеки конечных элементов

Когда в программной документации говорят о типах конечных элементов, то обычно под этим подразумевают ссылку на номер или иной идентификационный признак (например, имя) соответствующего раздела из задействованной в программе *библиотеки конечных элементов*. В таблице 3.2-1 дана классификация типов КЭ, включеных в библиотеку конечных элементов, возможные признаки расчетной схемы[1] для их работы, идентификация вычисляемых усилий (напряжений).

**Таблица 3.2-1**

| № типа КЭ | Наименование | Допустимые признаки схемы | Вычисляемые напряжения и усилия | Назначение и возможности |
|---|---|---|---|---|
| 1-10 | **Стержни Эйлера-Бернули** | | | Произвольные стержневые системы с учетом:<br>• наличия жестких вставок;<br>• упругого основания по одному (типы 1, 3, 7 и 103), двум (типы 2 и 102) или трем направлениям главных осей инерции (типы 5, 6, 10, 105 и 110);<br>• сдвига и предварительного обжатия (типы 2, 5, 6, 10) [29];<br>• сдвига и предварительного обжатия по гипотезам Тимошенко (типы 102, 103, 105, 110);<br>• депланации.<br>*Примечание:* элементы типа 6 и 7 сохранены для преемственности версий. |
| 1 | плоской фермы | 1, 2, 4, 5, 8, 9 | $N$, $M(M_Y)$, $Q(Q_Z)$, $r_X$ | |
| 2 | плоской рамы | 2, 5, 8, 9 | $N$, $M(M_Y)$, $Q(Q_Z)$, $r_X$, $r_Z$ | |
| 3,7 | балочного ростверка | 3, 5, 8, 9 | $M_K(M_X)$, $M_Y$, $Q_Z$, $r_Z$ | |
| 4 | пространственной фермы | 4, 5, 8, 9 | $N$, $M_K$, $M_Y$, $Q_Z$, $M_Z$, $Q_Y$, $r_X$, $r_Y$, $r_Z$, $B$, $T_w$ | |
| 5,6 | пространственный | 5, 8, 9 | | |
| 10 | универсальный | 1–5, 8, 9 | в зависимости от типа схемы | |
| **101-110** | **Стержни Тимошенко** | | | |
| 102 | плоской рамы | 2, 5, 8, 9 | $N$, $M(M_Y)$, $Q(Q_Z)$, $r_X$, $r_Z$ | |
| 103 | балочного ростверка | 3, 5, 8, 9 | $M_K(M_X)$, $M_Y$, $Q_Z$, $r_Z$ | |
| 105 | пространственный | 5, 8, 9 | $N$, $M_K$, $M_Y$, $Q_Z$, $M_Z$, $Q_Y$, $r_X$, $r_Y$, $r_Z$, $B$, $T_w$ | |
| 110 | универсальный | 1–5, 8, 9 | в зависимости от типа схемы | |
| 11-20 | **Тонкие плиты (теория Киргофа-Лява)** | 3, 5, 8, 9 | $M_X$, $M_Y$, $M_{XY}$, $Q_X$, $Q_Y$, $R_Z$ – при наличии упругого основания | Изгибаемые пластины, лежащие в плоскости XOY.<br>Материал: |

[1] Основные характеристики схем в зависимости от значения их признака приведены в главе 28, табл. 28.3-2

| № типа КЭ | Наименование | Допустимые признаки схемы | Вычисляемые напряжения и усилия | Назначение и возможности |
|---|---|---|---|---|
| 111-120<br>511-520 | **Плиты средней толщины (теория Рейсснера-Миндлина)** | | | • изотропный;<br>• ортотропный;<br>• анизотропный материал.<br>Допускается наличие упругого основания<br>***Примечание:*** элементы типа 13 и 14 сохранены для преемственности версий. |
| 21-30<br>121-130<br>521-530 | **Плоская задача теории упругости** | 1, 2, 4, 5, 8, 9<br>2, 5, 8, 9 | $N_X$, $N_Z$, $N_{XZ}$<br>$N_Y$ – только при плоской деформации;<br>$R_X$, $R_Z$ — при наличии упругого основания | Позволяют рассчитывать два типа конструкций:<br>а) плосконапряженное состояние;<br>б) плоскую деформацию.<br>Материал:<br>• изотропный;<br>• ортотропный;<br>• анизотропный.<br>• трансверсально-изотропный (плоская деформация)<br>Допускается наличие упругого основания в плоскости. |
| 31-40 | **Объемные конечные элементы** | 4, 5, 8, 9 | $N_X$, $N_Y$, $N_Z$,<br>$T_{XY}$, $T_{XZ}$, $T_{YZ}$ | Для решения пространственной задачи теории упругости, для изотропного, трансверсально-изотропного, ортотропного и анизотропного материала |
| 41-50<br>91-99<br>591-599 | **Тонкие оболочки (теория Киргхофа-Лява)** | 5, 8, 9 | $N_X$, $N_Y$, $T_{XY}$,<br>$M_X$, $M_Y$, $M_{XY}$, $Q_X$ и $Q_Y$, $R_X$, $R_Y$, $R_Z$ – при наличии упругого основания.<br>*NX+, NX-,NY+ , NY-,NXY+,NXY-,* $SN_X$, $SN_Y$, $ST_{XY}$ – в графическом постпроцессоре: | Расчет тонких и средней толщины оболочек. Элементы нулевой кривизны (плоские). Материал:<br>• изотропный;<br>• ортотропный;<br>• анизотропный.<br>Допускается наличие упругого основания<br>Геометрические особенности оболочки учитываются геометрией вписанного многогранника |
| 141-150<br>191-199<br>541-550 | **Оболочки средней толщины (теория Рейсснера-Миндлина)** | | | |
| 51-55 | **Упругоподатливые связи** | любой | **реакции** по направлениям заданных связей | Учет:<br>* действия упругого основания на узлы конструкции, включая присоединенную (законтурную) его часть;<br>* упругой связи между двумя узлами конструкции |
| 56-57 | **Демпферы** | любой | **нет** | Учет неоднородного демпфирования при прямом интегрировании уравнений движения |
| 61-70<br>161-170<br>561-570 | **Осесимметричные** | 11<br>12 | $N_X$, $N_Y$, $N_Z$, $T_{YZ}$ | Для расчета осесимметричных конструкций. Все элементы лежат в сечении тела плоскостью ROZ |

| № типа КЭ | Наименование | Допустимые признаки схемы | Вычисляемые напряжения и усилия | Назначение и возможности |
|---|---|---|---|---|
| 71-80 | **Многослойные оболочки,** учитывающие поперечный сдвиг, обжатие слоев и кривизну | 8 | $N_X$, $N_Y$, $N_Z$, $T_{XY}$, $T_{XZ}$, $T_{YZ}$ Вычисляются на верхней и нижней поверхностях каждого слоя. В графическом постпроцессоре: $M_X$, $M_Y$, $M_{XY}$, $Q_X$, $Q_Y$, $SN_X$, $SN_Y$, $ST_{XY}$ — | Прочностной расчет тонких, средней толщины и толстых однослойных и многослойных изотропных, трансверсальноизотропных и ортотропных оболочек. Могут резко отличаться упругие характеристики слоев, для которых применение гипотезы прямых нормалей становится неправомерным, так как может привести к искажению результатов |
| 81-90 | **Многослойные оболочки,** учитывающие межслоевые сдвиги и кривизну | 9 | | |
| 100 | **Жесткое тело** | любой | | |
| 151-160 | **Нуль-элементы** | любой | | Для назначения связей (задания перемещений) по направлениям, которые не совпадают с направлениями осей общей системы координат |
| 200 | Удаленный элемент | | | Использовался в ранних версиях для сохранения нумерации элементов |

В теории метода конечных элементов установлен ряд важных теорем о сходимости[1], например, для совместных элементов [59] определено, что если $(k–1)$ является степенью полинома, с помощью которого внутри конечных элементов аппроксимируются перемещения, и решается эллиптическая краевая задача порядка $2m$, для которой получено приближенное решение в перемещениях $u_h$, то ошибка в энергии, по сравнению с точным решением $u$, составляет

$$U(u–u_h, u–u_h) \le Ch^{2(k–m)} \|u\|^2_k,$$

где $h$ — это минимальный диаметр шара, в который можно вложить любой КЭ расчетной схемы. В этой оценке справа участвует норма $\|u\|_k$ — среднеквадратичная величина $k$-ой производной от искомой функции $u$.

Для несовместных КЭ аналогичные оценки получены в работах И.Д. Евзерова [12] и В.С. Карпиловского [22, 23].

Математически доказанные условия сходимости метода конечных элементов полезно дополнить некоторыми соображениями механического характера, которые создают возможность неформального анализа. Аппроксимация поля перемещений и усилий некоторым конечным набором заранее заданных функций сужает возможность произвольного деформирования, т. е. может трактоваться как наложение некоторых связей. Если элементы несовместны, то по их границам возможны некоторые перемещения, не существующие в континуальной расчетной модели (например, взаимные углы поворота пластин), которые соответствуют отсутствию некоторых связей.

При увеличении числа конечных элементов и уменьшении их размеров растет общее число степеней свободы конструкции и, следовательно, уменьшается влияние наложенных связей. Этот процесс при выполнении определенных условий и обеспечивает сходимость метода для совместных конечных элементов. С другой стороны, этот же процесс ведет к тому, что уменьшаются взаимные перемещения на межэлементных границах в несовместных элементах, что можно трактовать как определенное замыкание ранее снятых связей. Значит, сходимость несовместных элементов может иметь место лишь в тех случаях, когда положительные тенденции от преодоления наложенных связей превалируют над этой отрицательной тенденцией наложения связей на межэлементных границах.

Усилия и напряжения, возникающие в конечных элементах, по умолчанию вычисляются в начале, середине и конце стержня, а для других типов КЭ — в центре тяжести. Можно заказать

[1] см. также разд. 2.7

вычисление усилий для стержней в промежуточных сечениях, а для других типов КЭ — в узлах. Обычно усилия и напряжения в КЭ вычисляются в местной системе координат. Для стержней, например, это главные оси инерции поперечных сечений гибкой части. Для всех плоских и объемных КЭ возможно задание специальной системы координат вычисления усилий.

В настоящей главе представлен состав библиотеки конечных элементов для линейного расчета. Описание результатов расчета и правила знаков для каждого типа конечного элемента приведены в главе 13. Состав библиотеки конечных элементов для нелинейных расчетов представлен в главе 26.

Положительные направления перемещений по осям X, Y и Z совпадают с положительным направлением соответствующей оси, положительные направления углов поворота $U_X$, $U_Y$ и $U_Z$ противоположны направлению вращения часовой стрелки, если смотреть с конца соответствующей оси.

Для нагрузок различного вида, задаваемых на конечные элементы, в системе приняты следующие правила знаков:

- положительный знак силы означает, что она направлена против направления осей местной или общей систем координат;
- положительный знак момента означает, что его направление совпадает с направлением вращения часовой стрелки, если смотреть с конца соответствующей оси;
- при положительном знаке температурного перепада считается, что верхнее (если смотреть с конца соответствующей оси) волокно имеет более высокую температуру, чем нижнее.

При вводе исходных данных в режиме графического диалога, как правило, не возникает проблем задания информации для тех или иных типов конечных элементов. Данную главу дополняет глава 29, где приведена необходимая информация для подготовки данных в текстовом формате.

При описании данных в главе используется «базовая» система единиц: Т, м и размеры сечений стержневых элементов — в см.

## 3.3. Стержневые элементы

Этот раздел посвящен описанию стержневых элементов различных видов.

### Местные системы координат стержня

Стержневой конечный элемент универсального вида изображен на рис. 3.3-1. На его концах могут быть абсолютно жесткие (недеформируемые) вставки BD и CE. Узел B является началом стержня, узел C — его концом. Для упругой части стержня DE принято следующее обозначение концевых сечений: номером 1 обозначается сечение у начала стержня, номером 2 — у его конца.

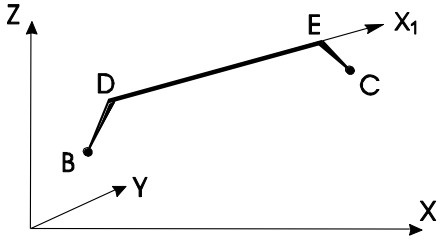



Рис. 3.3-1

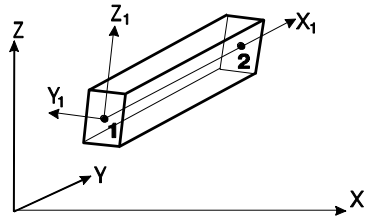



Рис. 3.3-2

В общем случае предполагается, что стержень может быть произвольным образом расположен по отношению к принятой общей системе координат XYZ. Однако характеристики отдельно взятого конечного элемента стержневого типа удобнее получать в системе координат, определенным образом связанной с данным элементом. Для этого на упругой части, изображенной на рис. 3.3-2, определена местная система координат $X_1Y_1Z_1$[1], относительно которой вычисляются усилия и задаются некоторые исходные данные. В этой системе оси $Y_1$ и $Z_1$ являются главными осями инерции поперечного сечения.

[1] В **SCAD** используются только правые системы координат. Система координат считается правой, если ось Y образуется поворотом оси X против часовой стрелки при взгляде с конца оси Z на угол 90°.

Однако еще до ввода информации о форме поперечного сечения система **SCAD** строит оси («предварительный проект») локальной системы координат $X_1^0Y_1^0Z_1^0$ (рис. 3.3-3, *а*) с использованием следующих соображений:

- ось $X_1^0$ направлена вдоль геометрической оси упругой части сечения от начала стержня к его концу;
- ось $Z_1^0$ ориентирована в верхнее полупространство (в сторону возрастания координаты Z общей системы координат XYZ, в которой представлена расчетная схема);
- ось $Y_1^0$ дополняет локальные координаты таким образом, что система образует правую тройку $X_1^0Y_1^0Z_1^0$.

*а*) *б*)

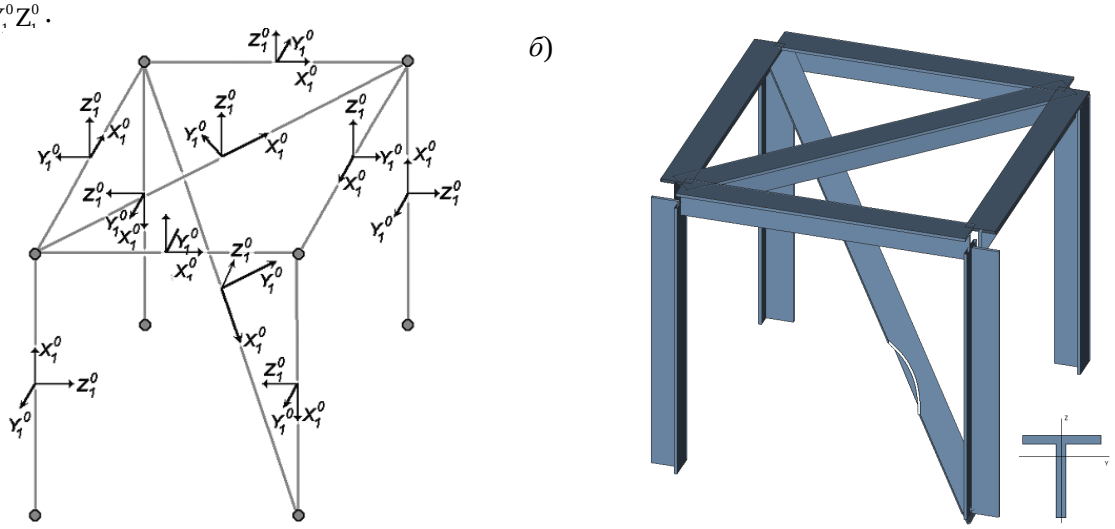


Рис. 3.3-3

Конкретное поперечное сечение располагается таким образом, что его конструктивные оси *y* и *z* совмещаются с осями $Y_1^0$ и $Z_1^0$. Система конструктивных осей сечения *y*O*z* представляется на чертеже поперечного сечения в сортаменте металлопроката, в окнах программ **Конструктор сечений**, **ТОНУС** и **Консул**. Если же используются параметрически задаваемые сечения, то предполагается, что конструктивная ось *y* расположена горизонтально, а ось *z* — вертикально.

Чаще всего системы конструктивных осей *y*O*z* и главных осей инерции $Y_1OZ_1$ совпадают или, по крайней мере, параллельны друг другу, как это показано на рис. 3.3-4,*а*, тогда предварительно построенная система $X_1^0Y_1^0Z_1^0$ отождествляется с системой $X_1Y_1Z_1$. Но встречаются случаи, когда оси ($Y_1$, $Z_1$) повернуты по отношению к осям (*y*, *z*) на некоторый угол $F_U$ (угол наклона главных осей инерции к конструктивным осям сечения), как это показано на рис. 3.3-4,*б*. Этот угол указан в сортаментах металлопроката или определяется в программах **Конструктор сечений, ТОНУС** и **Консул**, как угол между горизонтальной конструктивной осью *y* и главной осью инерции U, относительно которой сечение имеет максимальную жесткость. Если угол $F_U \neq 0$, то окончательное положение главных осей инерции поперечного сечения определяется поворотом предварительно определенных осей $Y_1^0$ и $Z_1^0$ на этот угол, при этом ось $Y_1$ совмещается с осью U, а ось V — с осью $Z_1$. Обращаем внимание на то, что изменяют положение в пространстве только оси, а не само поперечное сечение.

*а*) *б*)

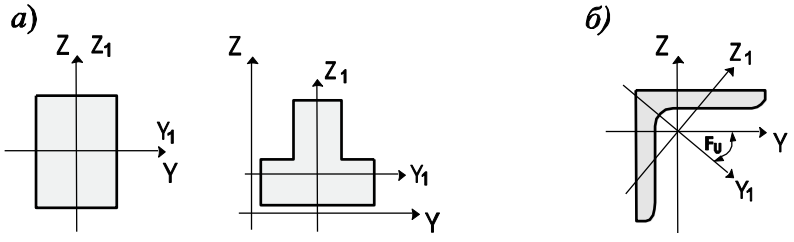



Рис. 3.3-4

Если вариант ориентации стержня в пространстве, получаемый описанным способом, не удовлетворяет с точки зрения расположения поперечного сечения стержня, то для этого предусмотрена возможность повернуть стержень (его сечение) вокруг продольной оси на любой угол, который потребуется по условиям задачи, задав в явном виде «угол разворота конструктивных осей»[1].

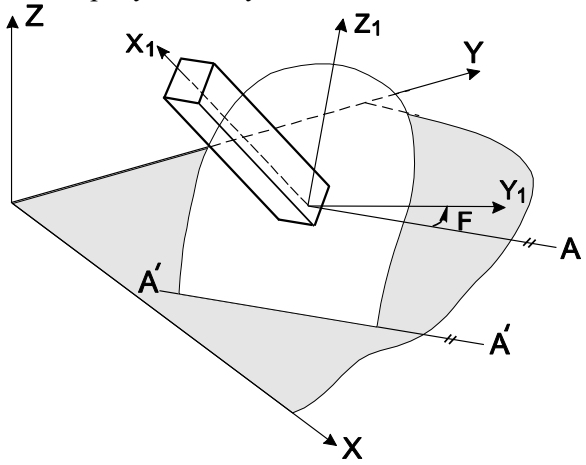


Рис. 3.3-5

Это угол между осью $Y_1$ и прямой, связанной с глобальной системой координат. В качестве такой прямой принимается линия пересечения плоскости, параллельной XOY, и плоскости поперечного сечения стержня $Y_1OZ_1$, проходящей через начало упругой части стержня (рис. 3.3-5). Эта прямая (ось A) ориентирована так, чтобы тройка $X_1AZ_1$ была правой. При этом считается, что оси $X_1Y_1Z_1$ образуют правую тройку, а ось $Z_1$ всегда направлена в верхнее полупространство (в сторону возрастания координаты Z).

Положительное значение угла ориентации F определяется поворотом оси A до ее совмещения с осью $Y_1$ против часовой стрелки, если смотреть с конца оси $X_1$.

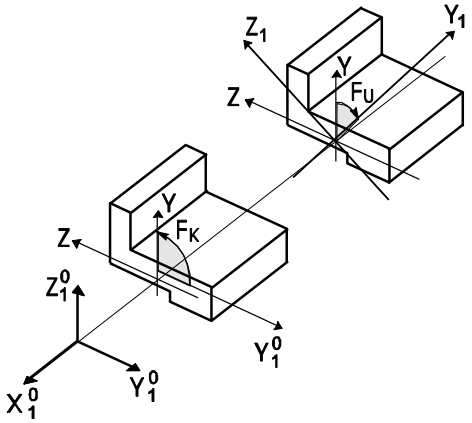


Рис. 3.3-6

Окончательно положение главных осей инерции поперечного сечения определяется значением суммы «угла разворота конструктивных осей $F_K$» между конструктивной осью Y (Z) и осью $Y_1^0\left(Z_1^0\right)$ с углом наклона главных осей инерции к конструктивным осям сечения $F_U$ (рис. 3.3-6). При назначении сечений из сортамента металлопроката или же при использовании для этого программ **Конструктор сечений, ТОНУС** и **Консул** учет угла $F_U$ выполняется системой автоматически.

Положительное значение углов $F_K$ ($F_U$) определяется поворотом сечения против часовой стрелки, если смотреть с конца оси $X_1$. Таким образом, на рис. 3.3-6 угол $F_K$ является положительным, а угол $F_U$ — отрицательным.

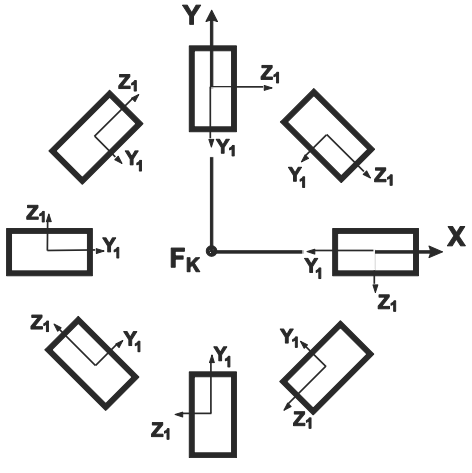


Рис. 3.3-7

Более удобным способом задания положения локальных осей по отношению к глобальным координатам является задание некоторой дополнительной точки (точка ориентации), которая должна иметь положительную координату $Y_1$ или $Z_1$ (см. ниже). Так для всех вертикальных колонн цилиндрического сооружения (рис. 3.3-7) задается одна и та же точка ориентации $F_K$ с координатами центра круга сооружения (предполагается, что глобальные оси проведены через этот центр).

Для того чтобы расположить стержень в пространстве вполне определенным способом, следует указать, какой именно угол используется — с конструктивными или с главными осями инерции. При этом можно задать, какая именно из осей $Y_1$ или $Z_1$ (аналогично *y* или *z*) направлена в сторону точки ориентации. Естественно, что результат при этом меняется (рис. 3.3-8).

[1] В предыдущих редакциях документации этот угол назывался «углом чистого вращения», затем «углом ориентации главных осей инерции» и приобрел кнопку на инструментальной панели **Назначения**. Наименование «угол разворота конструктивных осей» более точно отражает существо проблемы, поскольку переход к главным осям инерции, не совпадающим с конструктивными, происходит автоматически.

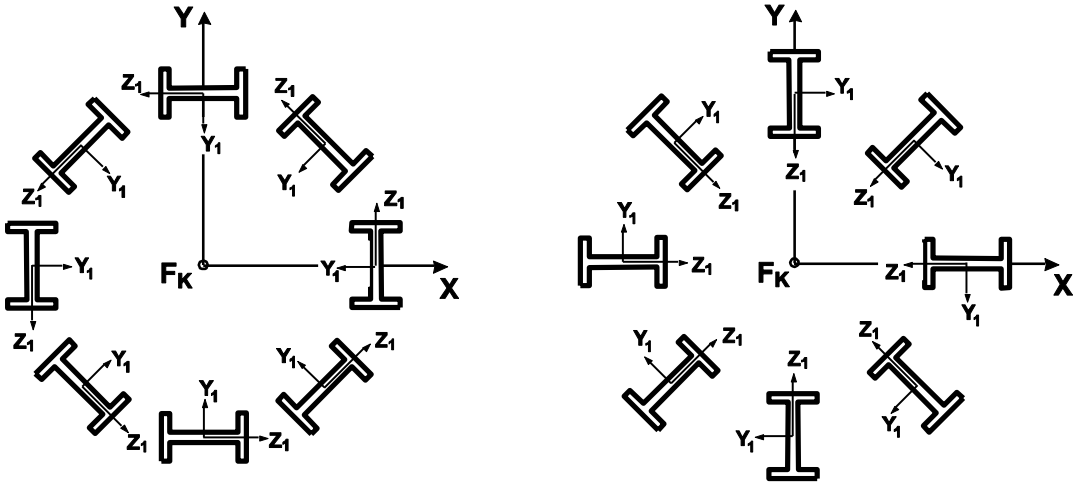



Рис. 3.3-8

**Следует, однако, помнить, что при использовании сечений, у которых не равен нулю угол $F_U$, может оказаться, что схема типа «плоская рама» некорректна. Это связано с тем, что главные оси инерции стержня не лежат в выбранной силовой плоскости. При контроле исходных данных такие ошибки идентифицируются. Эта ситуация, казалось бы, не должна иметь место при расчете конструкций, где в составе системы стержни работают только на растяжение/сжатие (элементы типа 1 или 4). Но поскольку в SCAD и для таких случаев предусмотрена, например, местная нагрузка по направлениям главных осей инерции, то она может уже не действовать в плоскости рамы. Поэтому запрет сохраняется и в этом случае.**

## Общее описание стержневых конечных элементов

Как видно из таблицы 3.3-1, стержневые конечные элементы реализованы как частные случаи универсальных стержневых элементов типа 10 и 110.

В стержнях типа 10 при отсутствии сдвига дифференциальное уравнение изгиба имеет общее решение в виде полинома третьей степени [16, 55]. Для случая, когда рассматривается стержень, податливый на сдвиг, и/или «обжатый стержень», имеющий ненулевую продольную силу, применяется дифференциальное уравнение стержня Тимошенко, модифицированное с учетом сдвигов, для которого общее решение дается в трансцендентных функциях Корноухова [29].

В стержнях типа 110 нормальные перемещения и углы поворота аппроксимируются полиномами третьей степени, которые при отсутствии преднапряжения и упругого основания являются решениями системы однородных дифференциальных уравнений равновесия Эйлера [30, 90]. Если для стержня Тимошенко не заданы сдвиговые жесткостные характеристики, то будет работать балка Бернулли.

Если стержневые конечные элементы реализуют точное решение, то для уточнения решения не требуется выполнять дробление стержневых конечных элементов. Иначе решение является приближенным и может уточняться путем дробления элементов.КЭ.

Продольные перемещения и поворот вокруг оси стержня аппроксимируются полиномами первой степени.

Возможно задание жестких вставок на концах для каждого типа стержневого элемента, упругого основания по одному (типы 2, 3, 7, 102, 103) или двум направлениям главных осей инерции (типы 5, 6, 10, 105, 110), сдвига и предварительного обжатия (типы 2, 5, 6, 10, 102, 105, 110).

Концевые сечения упругой части стержня могут различными способами прикрепляться к узлам конструкции или к концам жестких вставок, так как для этих сечений предусматривается возможность снятия связи стержня по любой степени свободы, связанной с координатами $X_1Y_1Z_1$.

Снятие связи, соответствующей линейной степени свободы, обеспечивает проскальзывание, снятие угловой связи — свободный поворот (цилиндрический шарнир). При этом программа контролирует, чтобы комбинация снятых связей не приводила к геометрической изменяемости (с учетом используемого признака типа схемы).

На стержень допускается задание разнообразных местных нагрузок, действующих как в системе координат $X_1Y_1Z_1$, так и в общей системе координат XYZ.

Конечные элементы типа 10 и 110 могут работать со всеми признаками типа схемы, применяемыми при расчете конструкций. В других частных случаях требуется согласование признака схемы в соответствии с типом используемого стержневого элемента. Соответствие признаков схемы и типа стержневой процедуры приведено в таблице 3.3-1.

### Виды стержневых конечных элементов

Список различных конечных элементов стержневого типа с указанием частных случаев их применения в системах различного типа и возможным вариантом расположения в пространстве приведен в таблице 3.3-1 и на рис. 3.3-9.

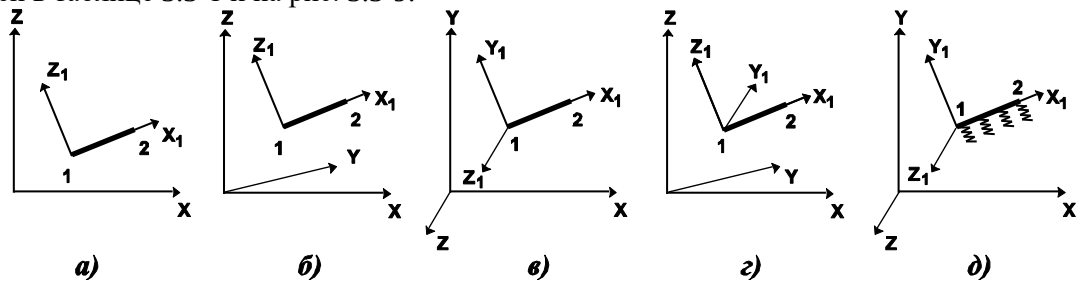



Рис. 3.3-9

**Таблица 3.3-1**

| N КЭ | Наименование КЭ | Признак схемы | Располо-жение | Степени свободы | Вычисляемые усилия |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Стержень плоской фермы (рис. 3.3-9, *а*) | 1, 2, 4, 5, 8, 9 | пл. XOZ | X, Z | N, $M_Y$, $Q_Z$, $r_X$ |
| 2<br>102 | Стержень плоской рамы (рис. 3.3-9, *б*) | 2, 5, 8, 9 | пл. XOZ | X, Z, $U_Y$ | N, $M_Y$, $Q_Z$, $r_X$, $r_Z$ |
| 3<br>103 | Стержень балочного ростверка (рис. 3.3-9, *в*) | 3, 5, 8, 9 | пл. XOY | Z, $U_X$, $U_Y$ | $M_K$ ($M_X$), $M_Y$, $Q_Z$, $r_Z$ |
| 4 | Стержень пространственной фермы (рис. 3.3-9, *г*) | 4, 5, 8, 9 | любое | X, Y, Z | N, $M_K$, $M_Y$, $Q_Z$, $M_Z$, $Q_Y$, $r_X$ |
| 5<br>105 | Пространственный стержень (рис. 3.3-9, *г*) | 5, 8, 9 | любое | X, Y, Z, $U_X$, $U_Y$, $U_Z$ | N, $M_K$, $M_Y$, $Q_Z$, $M_Z$, $Q_Y$, $r_X$, $r_Y$, $r_Z$, B, $T_w$ |
| 6 | Пространственный стержень с учетом сдвига (рис. 3.3-9, *г*) | 5, 8, 9 | любое | | |
| 7 | Стержень балочного ростверка на упругом основании (рис. 3.3-9, *д*) | 3, 5, 8, 9 | пл. XOY | Z, $U_X$, $U_Y$ | $M_K$ ($M_X$), $M_Y$, $Q_Z$, $r_Z$ |
| 10<br>110 | Универсальный стержень | любой | по признаку схемы | по признаку схемы или типу элемента | N, $M_K$, $M_Y$, $Q_Z$, $M_Z$, $Q_Y$, $r_X$, $r_Y$, $r_Z$ |

В таблице 3.3-1 приведены также вычисляемые в стержнях усилия, описание которых приведено в разделе 13.6.

## Особенности задания исходной информации для стержневых конечных элементов

Исходная информация, связанная со стержневыми конечными элементами, содержит данные об их жесткостных характеристиках, включая описание сечения, условиях примыкания и нагрузках, которые приложены к элементам.

### *Описание сечения*

**Таблица 3.3-2**

| Тип элемента | Перечень задаваемых жесткостных характеристик |
|---|---|
| 1 | EF |
| 2, 102 | EF $EI_Y$ [$GF_Y$] |
| 3, 7, 103 | $EI_Y$ $GI_{kr}$ |
| 4 | EF |
| 5, 6, 105 | EF $EI_Y$ $EI_Z$ $GI_{kr}$ [$GF_Y$ $GF_Z$] |
| 10, 110 | По признаку схемы |

EF — продольная жесткость (Т);
$EI_Y$ — изгибная жесткость относительно оси $Y_1$ ($Тм^2$);
$EI_Z$ — изгибная жесткость относительно оси $Z_1$ ($Тм^2$);
$GI_{kr}$ — крутильная жесткость ($Тм^2$);
$GF_Y$ — сдвиговая жесткость относительно оси $Y_1$ (Т);
$GF_Z$ — сдвиговая жесткость относительно оси $Z_1$ (Т);
$l_{Y,1}$, $l_{Y,2}$, $l_{Z,1}$ и $l_{Z,2}$ — размеры ядра сечения в (м).

Размеры ядра сечения (рис. 3.3-10) необходимы при выборе расчетных сочетаний усилий.

В качестве дополнительной информации, необходимой при выполнении некоторых видов расчетов, численные характеристики дополняются информацией о модуле упругости материала и коэффициенте Пуассона.

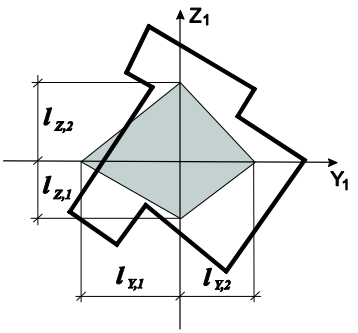



Рис. 3.3-10

Реализованные в комплексе функции задания жесткостных характеристик стержневым элементам позволяют описать их следующими способами:

- численно в виде набора жесткостных характеристик;
- как параметрические (типовые) сечения;
- как численно-параметрическое описание, при котором одновременно задаются параметрическое сечение и численное описание;
- путем выбора сечения из сортамента металлопроката;
- путем назначения составного сечения из сортамента металлопроката;
- как результат работы программ **Конструктор сечений**, **Консул** или **ТОНУС**.

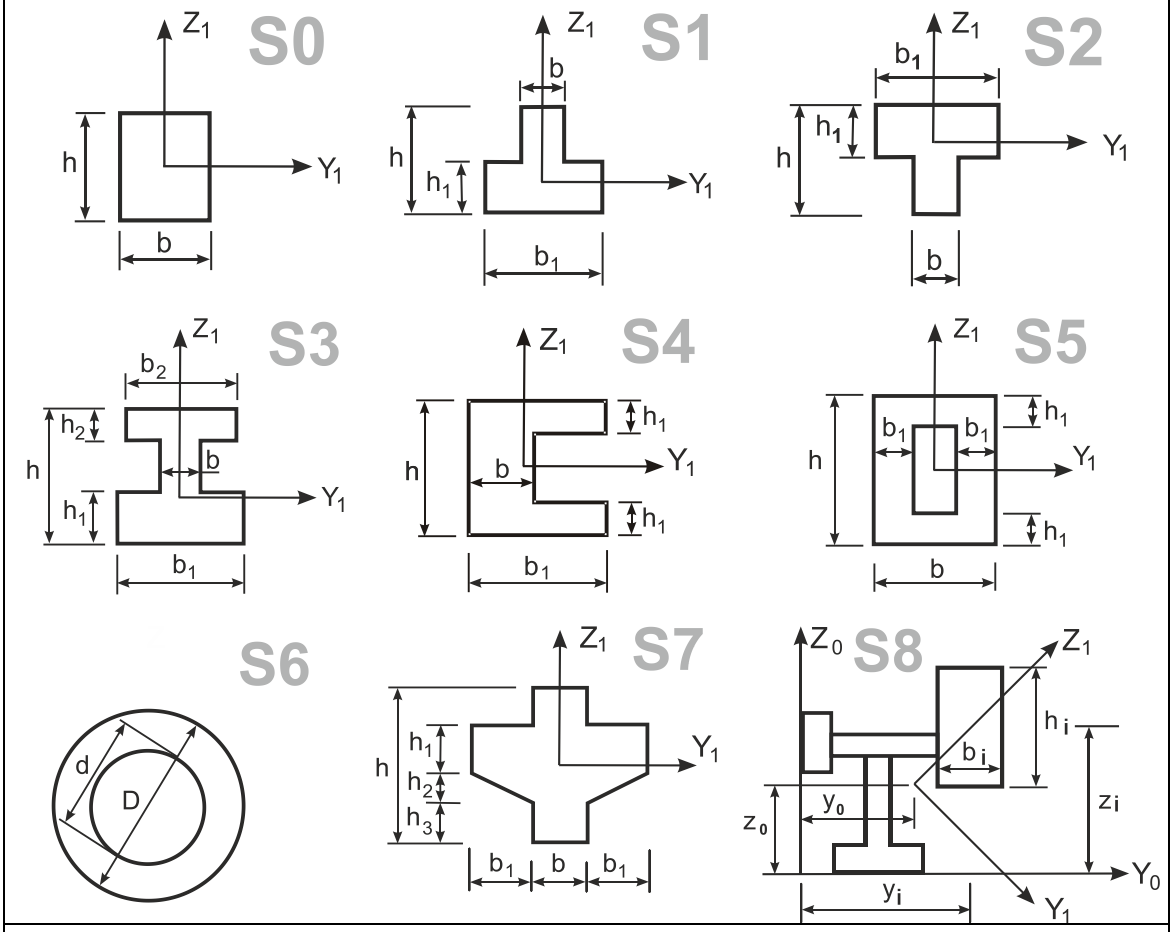
При **численном описании** для стержневого конечного элемента, в общем случае задаются жесткостные характеристики[1] упругой части стержня, перечисленные в табл 3.3-2.

При **параметрическом описании** предусмотрено задание сечений девяти видов, приведенных в табл. 3.3-3. Кроме размеров сечения необходимо задавать модуль упругости материала E. В базовых единицах измерения размеры сечения задаются в см, а модуль упругости в $Т/м^2$. По умолчанию принимается значение коэффициента Пуассона 0,2. Показанные рядом с изображением сечения идентификаторы **S0–S8** используются в текстовом формате архивации исходных данных для маркировки соответствующих сечений. При этом можно задавать переменное сечение стержня: соответствующие геометрические размеры линейно изменяются от начала гибкой части до ее конца.

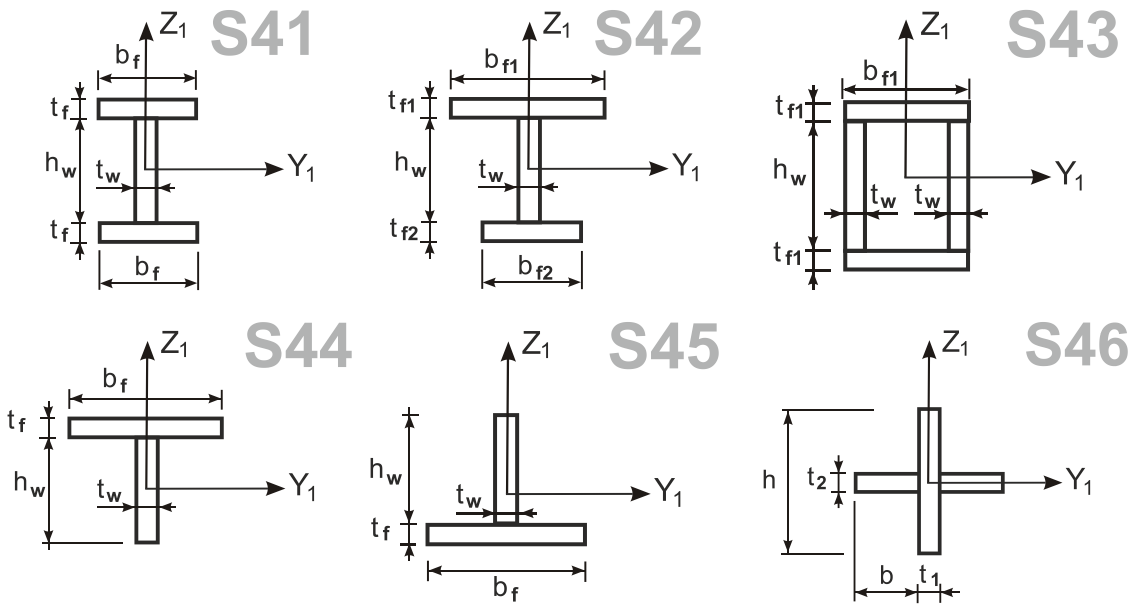
[1] Здесь и далее указаны базовые единицы измерения. Очевидно, что при выборе других единиц измерения соответственно изменятся и единицы измерения используемых величин.

**Таблица 3.3-3**

**Параметрические сечения**

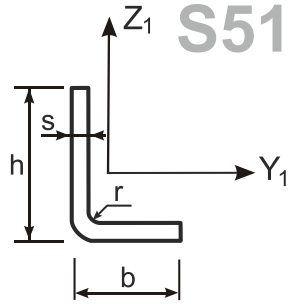



**Сварные сечения**

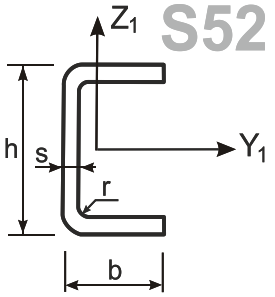


**Холодногнутые сечения**

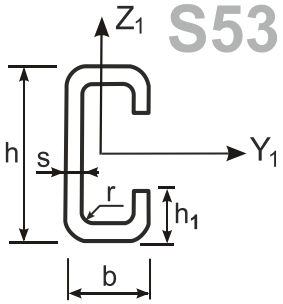
S51



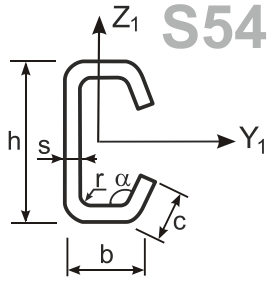

S52



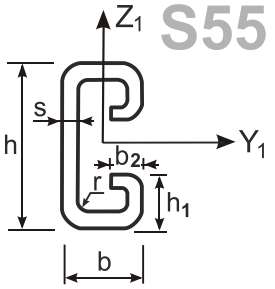

S53



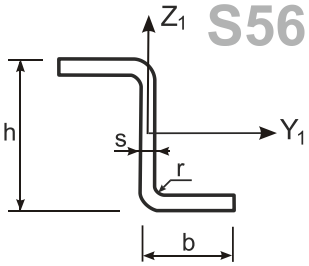

S54



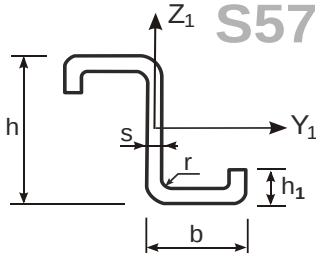

S55



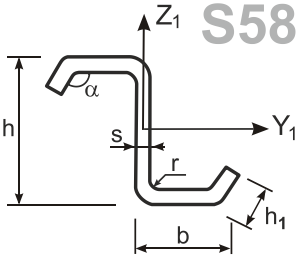

S56



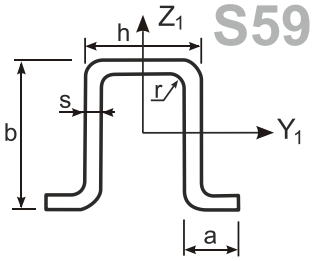

S57



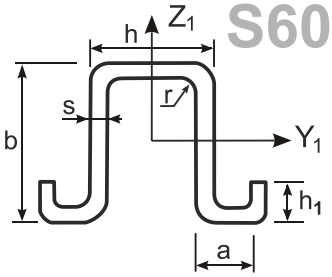

S58



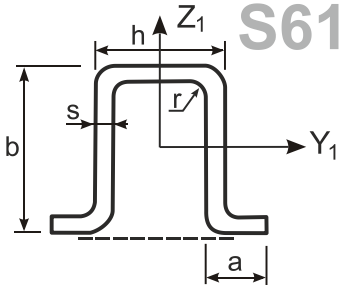

S59



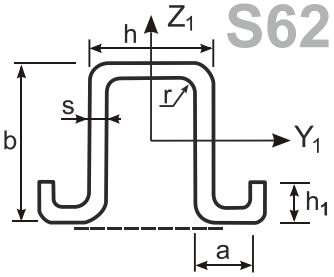

S60



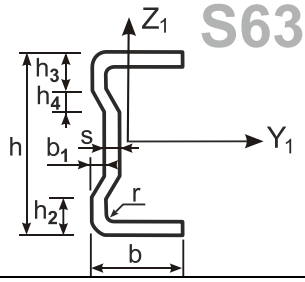

S61



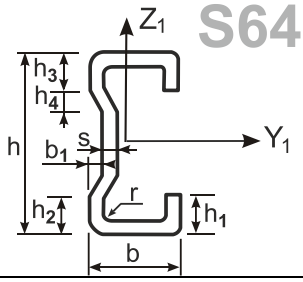

S62



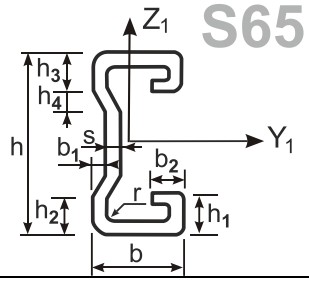

S63




S64

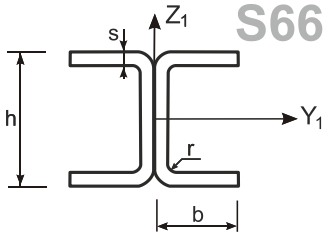



S65

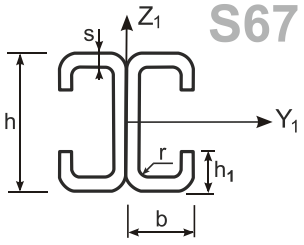



**Холодногнутые составные сечения**

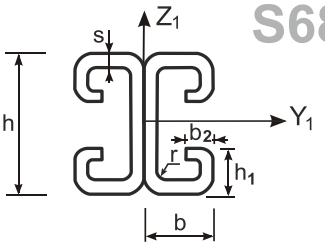
S66

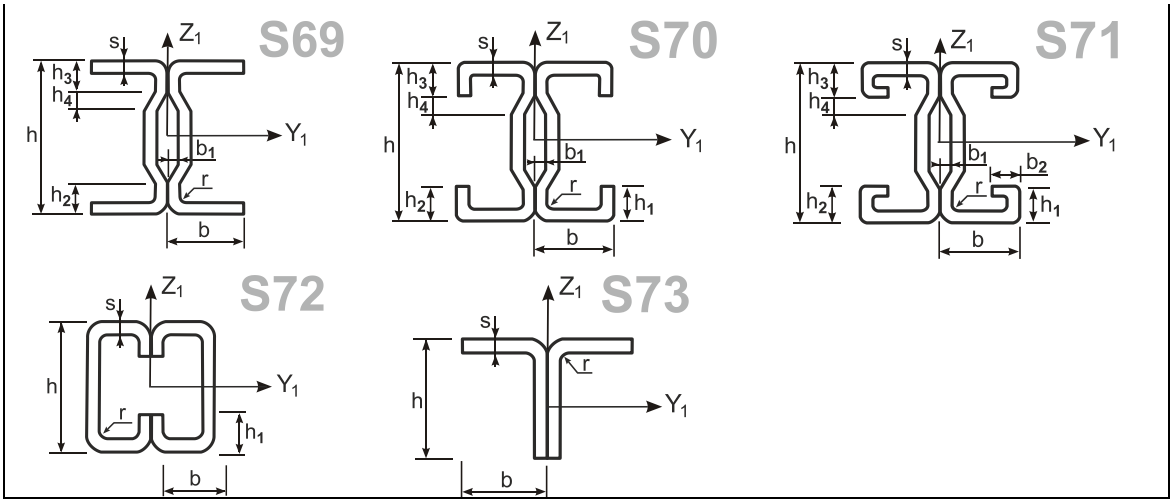



S67




S68






При **численно-параметрическом описании** одновременно задаются как численные характеристики жесткости, так и параметрическое сечение. В этом случае при определении напряженно-деформированного состояния конструкции учитываются численные характеристики, а тип и размеры сечения используются при выборе расчетных сочетаний, подборе арматуры и т. п.

При назначении жесткостных характеристик элементов путем выбора сечений из **сортамента металлопроката** все характеристики берутся из базы данных, которая постоянно пополняется и в настоящее время включает следующие сортаменты:

| Имя сортамента | Имя файла в корневом каталоге |
|---|---|
| Полный каталог профилей ГОСТ | russian.prf |
| Сокращенный сортамент ГОСТ | Russhort.prf |
| Старые сортаменты (1926, 1932 г.г.) | Rus_old.prf |
| Сортамент Челябинского металлургического комбината (СТО АСЧМ 20-93) | Aschm.prf |
| Великобритания, стандартные профили | British1.prf |
| Великобритания, импортируемые профили | British3.prf |
| Сварные профили | WELD.PRF |
| OTUA (Франция) | Otua.prf |
| DIN (Германия) | Din.prf |
| ARBED (Германия) | ARBED.PRF |
| ASTM (США) | Usa.prf |
| Японский сортамент | Japan.prf |
| Индийский сортамент | India.prf |
| Алюминиевые профили | Alum.prf |
| Сортамент стальных оцинкованных канатов | Cable.prf |
| Сортамент арматурных стержней по ГОСТ | RebarRU.prf |
| Сортамент арматурных стержней Республики Беларусь | RebarBY.prf |
| Сортамент арматурных стержней по ENV 10080:1996 | RebarEC.prf |
| Сортамент Польши | Poland.prf |
| Термопрофили стальные гнутые | Term2007.prf |
| Профили холодногнутые | Tu1121.prf |
| Профили холодногнутые стальные оцинкованные | Tu112101.prf |
| Сортамент Китая | China.prf |

По умолчанию значение модуля упругости стали для всех сортаментов принято 2,1e7 Т/м$^2$, объемного веса — 7,85 Т/м$^3$, а коэффициента Пуассона — 0,3. Более полная информация о содержании базы данных сортаментов металлопроката приведена в **Приложении**.

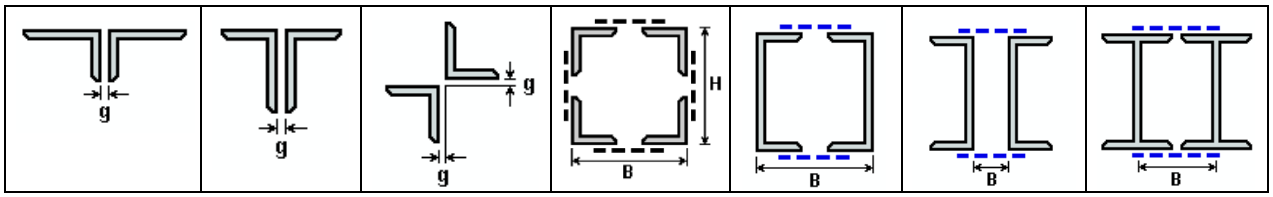



Рис. 3.3-11. *Составные сечения*

**Таблица 3.3-4**

| Базовый профиль | Тип компоновки | Вид сечения | Код типа компоновки | Параметры | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 1 | 2 |
| Равнополочный уголок | полками | | 0, 1 | g | |
| | крестом | | 2 | g | |
| | коробкой | | 3 | H | B |
| Неравнополочный уголок | короткими полками | | 0 | g | |
| | длинными полками | | 1 | g | |
| Швеллер | в виде коробки | | 0 | B | |
| | в виде двутавра | | 1 | B | |
| Двутавр | | | 0 | B | |

При назначении жесткостных характеристик из сортамента металлопроката предусмотрено использование **составных сечений** из уголков, швеллеров и двутавров. Виды сечений (рис. 3.3-11) и дополнительные параметры, задаваемые при их вводе, представлены в таблице 3.3-4.

### *Упругое основание*

Задание характеристик упругого основания возможно по направлению местных осей элемента $X_1$, $Y_1$ или $Z_1$. В общем случае предусматривается возможность использования двухпараметрического упругого основания (модель Пастернака), но при отсутствии данных о значении коэффициента постели $C_2$ автоматически реализуется переход к модели упругого основания Винклера с одним коэффициентом постели $C_1$.

При этом задаются по направлениям $Y_1$ и $Z_1$:

h(b) — ширина полосы взаимодействия сечения с упругим основанием по данному направлению (м);

$C_1$ — коэффициент постели типа Винклеровского (Т/м$^3$);

$C_2$ — Пастернаковский коэффициент постели (Т/м).

По направлению $X_1$ задаются:

*a* — ширина полосы взаимодействия сечения с упругим основанием по данному направлению (м);

$C_{1x}$ — коэффициент постели типа Винклеровского (Т/м$^3$).

### *Сдвиг и преднапряжение*

Для учета податливости элемента за счет сдвига:

- для КЭ типа 6, 102, 103, 105 и 110 достаточно задать значения сдвиговых жесткостей;
- для элементов типа 2, 5 и 10 необходимо задать дополнительный параметр в жесткостных характеристиках.

Для элементов 2, 5, 6, 10 при учете сдвига осуществляется переход от классической расчетной схемы стержня Эйлера-Бернулли к модели Тимошенко [38, 46].

Для элементов 2, 5, 6, 10, 102, 105 и 110 предусмотрена возможность указать величину обжатия (преднапряжения). При этом следует иметь в виду, что это обжатие относится только к рассматриваемому элементу и на систему не передается (как у монтируемого сборного

железобетонного преднапряженного стержня). При задании величины преднапряжения в качестве расчетной модели стержня для элементов 2, 5, 6, 10 принята модель Тимошенко [29].

Если требуется задать преднапряжение в системе, то пользователь должен самостоятельно следить за корректностью этого параметра в том смысле, что значения усилий предварительного напряжения должны соответствовать равновесному состоянию системы в целом (этого можно достичь, задавая соответствующее постоянное температурное загружение). Иными словами, в подавляющем большинстве случаев эти величины должны быть согласованы по всем элементам напрягаемой части системы.

Следует помнить, что статически определимую систему нельзя преднапрячь.

### Жесткие вставки

При введении в стержневые элементы жестких вставок упругая часть стержня отодвигается от узлов элемента. Она сохраняет старую локальную систему координат $X_1Y_1Z_1$, в которой ось $X_1$ совмещена с осью упругой части элемента, а оси $Y_1$ и $Z_1$ ориентированы вдоль главных осей инерции поперечного сечения. Одновременно появляется новая координатная система $X_2Y_2Z_2$ (см. рис. 3.3-12), у которой ось $X_2$ направлена от начального узла элемента к конечному, ось $Y_2$ располагается параллельно плоскости $Y_1Z_1$, а ось $Z_2$ дополняет эту систему до правой тройки.

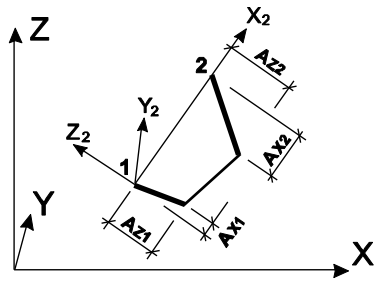



Рис. 3.3-12

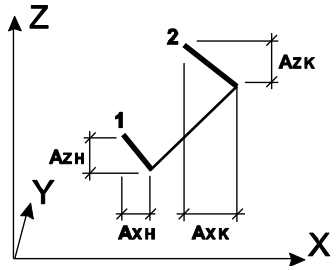



Рис. 3.3-13

В программе предусмотрены следующие два варианта описания жестких вставок:

- длины жестких вставок заданы в системе координат $X_2Y_2Z_2$, в которой ось $X_2$ проходит от первого узла ко второму (рис. 3.3-12). Угол поворота главных осей инерции в системе координат $X_2Y_2Z_2$ принимается равным заданному для гибкой части стержня;
- длины жестких вставок заданы в общей системе координат как векторы, направленные от узла к гибкой части (рис. 3.3-13).

При задании длин жестких вставок знак числа «минус» означает размер, отсчитанный против направления соответствующей оси. В базовой системе единиц значения величин задаются в метрах.

Положение жестких вставок в пространстве задается как значения проекций жестких вставок в начале и конце стержня на оси выбранной системы координат.

### Нагрузки на стержневые элементы

Стержневые конечные элементы допускают следующие местные нагрузки:

- сосредоточенная нагрузка, задаваемая в местной системе координат элемента;
- сосредоточенная нагрузка, задаваемая в общей системе координат;
- равномерно-распределенная нагрузка, задаваемая в местной системе координат элемента;
- равномерно-распределенная нагрузка, задаваемая в общей системе координат;
- трапециевидная нагрузка, задаваемая в местной системе координат элемента;
- трапециевидная нагрузка, задаваемая в общей системе координат;
- дислокация;
- температурное воздействие в виде общего нагрева/охлаждения по отношению к температуре замыкания или же температурного перепада между «верхней» и «нижней» гранями по сечению элемента (СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85* (с Изменениями N 1, 2, 3) / Свод правил от 03 декабря 2016 г.)).

Силы и моменты могут действовать по направлениям вдоль осей $X_1$, $Y_1$, $Z_1$ или X, Y, Z.

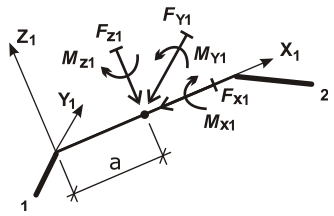
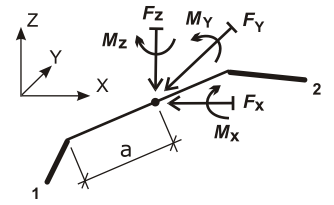
Сосредоточенные нагрузки задаются в виде значения силы или момента, действующих в заданном направлении и приложенных в точке на гибкой части элемента, расположенной на расстоянии ***a*** от ее начала (расстояние ***a*** может быть также задано в процентах от гибкой части элемента). Следовательно, нулевая привязка превратит местную нагрузку на стержне в соответствующую узловую лишь тогда, когда стержень не имеет жестких вставок.

Равномерно-распределенная нагрузка действует в заданном направлении и задается в виде интенсивности силы или момента, т. е. величиной силы или момента, приходящейся на единицу длины. Нагрузка может действовать и на жестких вставках, если не указан соответствующий параметр при вызове расчетного процессора (см. разд. 11).

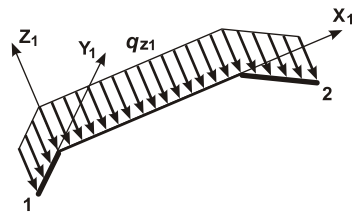
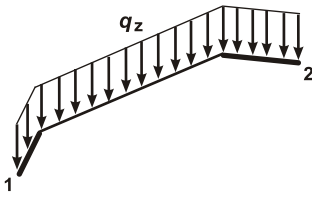
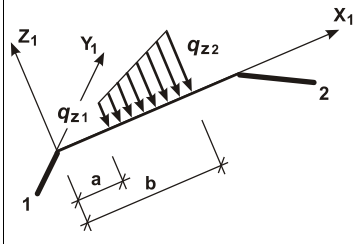
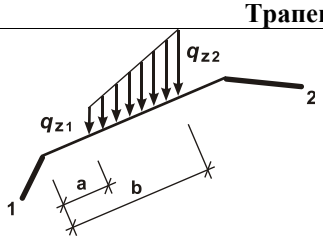
Трапециевидная нагрузка задается в виде двух значений интенсивности сил или моментов, определенных в начале и конце области действия нагрузки и действующих в заданном направлении. Считается, что начало и конец области действия нагрузки находятся, соответственно, на расстоянии ***a*** и ***b*** от начала гибкой части стержня (значения ***a*** и ***b*** могут быть также заданы в процентах от гибкой части элемента). Возможен учет нагрузки, приходящейся на жесткие вставки. При этом ***a*** (***b***) задается значением проекции на ось $X_1$ точки начала (конца) области действия нагрузки, лежащей на жесткой вставке.

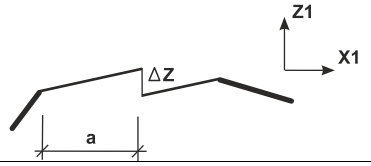
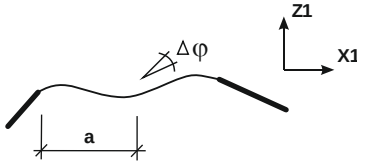
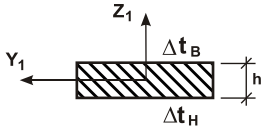
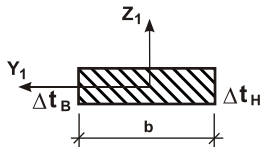
Полный перечень нагрузок на стержневые конечные элементы приведен ниже в таблице 3.3-5. В базовой системе предусмотрено задание нагрузок в следующих единицах измерения: силы в Т, моменты в Тм, температура в градусах Цельсия, привязки в м.

**Таблица 3.3-5**

| Схема нагрузки | Направление | Задаваемые величины | Тип КЭ |
|---|---|---|---|
| **Сосредоточенная нагрузка** в местной системе координат[1] | | | |
|  | вдоль оси $X_1$<br>вдоль оси $Y_1$<br>вдоль оси $Z_1$<br><br>вокруг оси $X_1$<br>вокруг оси $Y_1$<br>вокруг оси $Z_1$ | $F_{X1}$ a<br>$F_{Y1}$ a<br>$F_{Z1}$ a<br><br>$M_{X1}$ a<br>$M_{Y1}$ a<br>$M_{Z1}$ a | 1, 2, 4, 5, 6, 10, 102, 105, 110<br>4, 5, 6, 10, 105, 110<br>1–7, 10, 102, 103, 105, 110<br>3, 5, 6, 7, 10, 103, 105, 110<br>2, 3, 5, 6, 7, 10, 102, 103, 105, 110<br>5, 6, 10, 105, 110 |
| **Сосредоточенная нагрузка** в общей системе координат | | | |
|  | вдоль оси X<br>вдоль оси Y<br>вдоль оси Z<br><br>вокруг оси X<br>вокруг оси Y<br>вокруг оси Z | $F_X$ a<br>$F_Y$ a<br>$F_Z$ a<br><br>$M_X$ a<br>$M_Y$ a<br>$M_Z$ a | 1, 2, 4, 5, 6, 10, 102, 105, 110<br>4, 5, 6, 10, 105, 110<br>1–7, 10, 102, 103, 105, 110<br>3, 5, 6, 7, 10, 103, 105, 110<br>2, 3, 5, 6, 7, 10, 102, 103, 105, 110<br>5, 6, 10, 105, 110 |
| ***Примечание:*** Привязка сосредоточенных нагрузок на стержневые конечные элементы задаётся как расстояние от начала гибкой части или в долях длины гибкой части | | | |

[1]Привязка сосредоточенной и трапециевидной нагрузок на стержневые конечные элементы задается от начала гибкой части или в долях длины гибкой части.

| Схема нагрузки | Направление | Задаваемые величины | Тип КЭ |
|---|---|---|---|
| **Равномерно распределенная** нагрузка в местной системе координат | | | |
|  | вдоль оси $X_1$<br>вдоль оси $Y_1$<br>вдоль оси $Z_1$<br><br>вокруг оси $X_1$<br>вокруг оси $Y_1$<br>вокруг оси $Z_1$ | $q_{X1}$<br>$q_{Y1}$<br>$q_{Z1}$<br><br>$m_{X1}$<br>$m_{Y1}$<br>$m_{Z1}$ | 1, 2, 4, 5, 6, 10, 102, 105, 110<br>4, 5, 6, 10, 105, 110<br>1–7, 10, 102, 103, 105, 110<br>3, 5, 6, 7, 10, 103, 105, 110<br>2, 3, 5, 6, 7, 10, 102, 103, 105, 110<br>5, 6, 10, 105, 110 |
| **Равномерно распределенная** нагрузка в общей системе координат | | | |
|  | вдоль оси X<br>вдоль оси Y<br>вдоль оси Z<br><br>вокруг оси X<br>вокруг оси Y<br>вокруг оси Z | $q_X$<br>$q_Y$<br>$q_Z$<br><br>$m_X$<br>$m_Y$<br>$m_Z$ | 1, 2, 4, 5, 6, 10, 102, 105, 110<br>4, 5, 6, 10, 105, 110<br>1–7, 10, 102, 103, 105, 110<br>3, 5, 6, 7, 10, 103, 105, 110<br>2, 3, 5, 6, 7, 10, 102, 103, 105, 110<br>5, 6, 10, 105, 110 |
| **Собственный вес** | | | |
| | вдоль оси Z | $k$ – коэффициент учета собственного веса | любой |
| ***Примечание***: Для учета собственного веса необходимо задание характеристик сечения и удельного веса материала. | | | |
| **Трапециевидная** нагрузка в местной системе координат | | | |
|  | вдоль оси $X_1$<br>вдоль оси $Y_1$<br>вдоль оси $Z_1$<br><br>вокруг оси $X_1$<br>вокруг оси $Y_1$<br>вокруг оси $Z_1$ | $q_{X1}$ a $q_{X2}$ b<br>$q_{Y1}$ a $q_{Y2}$ b<br>$q_{Z1}$ a $q_{Z2}$ b<br><br>$m_{X1}$ a $m_{X1}$ b<br>$m_{Y1}$ a $m_{Y1}$ b<br>$m_{Z1}$ a $m_{Z1}$ b | 1, 2, 4, 5, 6, 10, 102, 103, 105, 110<br>4, 5, 6, 10, 105, 110<br>1–7, 10, 102, 103, 105, 110<br>3, 5, 6, 7, 10, 103, 105, 110<br>2, 3, 5, 6, 7, 10, 102, 103, 105, 110<br>5, 6, 10, 105, 110 |
| **Трапециевидная** нагрузка в общей системе координат | | | |
|  | вдоль оси X<br>вдоль оси Y<br>вдоль оси Z<br><br>вокруг оси X<br>вокруг оси Y<br>вокруг оси Z | $q_{X1}$ a $q_{X2}$ b<br>$q_{Y1}$ a $q_{Y2}$ b<br>$q_{Z1}$ a $q_{Z2}$ b<br><br>$m_{X1}$ a $m_{X2}$ b<br>$m_{Y1}$ a $m_{Y2}$ b<br>$m_{Z1}$ a $m_{Z2}$ b | 1, 2, 4, 5, 6, 10, 102, 105, 110<br>4, 5, 6, 10, 105, 110<br>1-7, 10, 102, 103, 105, 110<br>3, 5, 6, 7, 10, 103, 105, 110<br>2, 3, 5, 6, 7, 10, 102, 103, 105, 110<br>5, 6, 10, 105, 110 |
| ***Примечание:*** Привязка трапециевидных нагрузок на стержневые конечные элементы задаётся как расстояние от начала гибкой части или в долях длины гибкой части. | | | |

| Схема нагрузки | Направление | Задаваемые величины | Тип КЭ |
|---|---|---|---|
| **Дислокации, раздвижка** | | | |
|  | по оси X | Δx, a | 1, 2, 4, 5, 6, 10, 102, 105, 110 |
| | по оси Y | Δy, a | 4, 5, 6, 10, 105, 110 |
| | по оси Z | Δz, a | 1-7, 10, 102, 103, 105, 110 |
| **Дислокации, излом** | | | |
|  | на оси X | Δux, a | 3, 5, 6, 7, 10, 103, 105, 110 |
| | на оси Y | Δuy, a | 2, 3, 5, 6, 7, 10, 102, 103, 105, 110 |
| | на оси Z | Δuz, a | 5, 6, 10, 105, 110 |
| ***Примечание:*** Привязка дислокаций на стержневые конечные элементы задаётся как расстояние от начала гибкой части или в долях длины гибкой части. | | | |
| **Температурная** нагрузка | | | |
|  *Изменение средней температуры стержня* | растяжение (сжатие) вдоль оси $X_1$ | Δt, [α]<br>Δt — увеличение (уменьшение) температуры по отношению к нормальным условиям эксплуатации (температуре замыкания) | 1, 2, 4, 5, 6, 10, 102, 105, 110 |
|  *Перепад температур по сечению стержня, плоскость $X_1OZ_1$* | изгиб стержня вокруг оси $Y_1$ | $\Delta t_в$, $\Delta t_н$, h, [α]<br>$\Delta t_в$ — температура верхней грани сечения (по направлению оси $Z_1$);<br>$\Delta t_н$ — температура нижней грани сечения (против направления оси $Z_1$);<br>h — высота сечения. | 2, 3, 5, 6, 7, 10, 102, 103, 105, 110 |
|  *Перепад температур по сечению стержня, плоскость $Y_1OZ_1$* | изгиб стержня вокруг оси $Z_1$ | $\Delta t_в$ , $\Delta t_н$, b, [α]<br>$\Delta t_в$ — температура левой грани сечения (по направлению оси $Y_1$);<br>$\Delta t_н$ — температура правой грани сечения (против направления оси $Y_1$);<br>b — ширина сечения. | 5, 6, 10, 105, 110 |
| ***Примечание:*** При расчете используются коэффициенты температурного расширения, заданные в жесткостных характеристиках соответствующего элемента. При конвертации файлов предыдущих версий используется коэффициент температурного расширения, заданный при описании нагрузки. При этом выдается соответствующее предупреждение. Задание коэффициентов температурного расширения для конкретной нагрузки возможно лишь при подготовке данных в текстовом формате. | | | |

## 3.4. Плоские конечные элементы для расчета балок-стенок, тонких плит и пологих оболочек

### Класс решаемых задач

Плоские конечные элементы, описанные в данном разделе, ориентированы на решение следующих типов задач теории упругости [1, 2, 8, 10, 32, 52, 64]:

- анализ плоского напряженного состояния;

- анализ плоской деформации;
- изгиб тонких пластин;
- изгиб пластин по теории Рейсснера-Миндлина;
- расчет пологих оболочек.

При расчете оболочечных конструкций универсальным приемом представления их геометрии является использование близкого к срединной поверхности многогранника, который тем точнее представляет эту поверхность, чем меньше размеры граней. Если принять этот путь решения (а именно он реализован в системе **SCAD**), то целесообразно использовать элементы нулевой кривизны (плоские конечные элементы) с независимой аппроксимацией нормального и тангенциальных перемещений. Построение такого конечного элемента является простой комбинацией конечных элементов для плоского напряженного состояния и для изгиба пластины. Со сгущением сетки увеличивается точность аппроксимации поверхности оболочки геометрией вписанного многогранника, и сходимость МКЭ имеет теоретическое подтверждение [14].

## Материал конструкций

Предполагается, что материал элементов однороден по толщине и при этом имеется возможность учесть различные варианты упругой симметрии материала. Опишем их для плоскости XOY, используя следующие обозначения:

$\varepsilon_x$, $\varepsilon_y$, $\gamma_{xy}$ — относительные линейные и угловые деформации;

$\sigma_x$, $\sigma_y$, $\sigma_z$, $\tau_{xy}$ — нормальные и касательное напряжения;

$E_i$ — модуль Юнга по i-му главному направлению упругости (в случае их равенства для всех i используется обозначение E);

$G_{ij}$ — модуль сдвига, характеризующий изменение угла между i-м и j-м главными направлениями (в случае их равенства для всех пар i и j используется обозначение G);

$\nu$, $\nu_{ij}$ — коэффициенты Пуассона, характеризующие поперечное сокращение при сжатии или расширение при растяжении в направлении осей координат. Первый индекс показывает направление деформации, второй — направление действия силы;

$\eta_{ij,k}$ — коэффициенты взаимовлияния первого рода, характеризующие сдвиги в плоскостях, параллельных координатным, под действием нормальных напряжений;

$\eta_{k,ij}$ — коэффициенты взаимовлияния второго рода, характеризующие вызванные касательными напряжениями удлинения в направлениях, параллельных координатным осям.

В системе **SCAD** реализованы следующие варианты упругих свойств материала:

*а)* ***изотропное тело*** для плосконапряженного состояния и изгиба плиты:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}(\sigma_x - \nu\sigma_y), \quad \varepsilon_y = \frac{1}{E}(\sigma_y - \nu\sigma_x), \quad \varepsilon_{xy} = \frac{1}{G}\tau_{xy};$$

*б)* ***изотропное или трансверсально-изотропное тело*** для плоской деформации:

$$\varepsilon_x = (\sigma_x - \bar{\nu}\sigma_y)/\bar{E},\ \varepsilon_y = (\sigma_y - \bar{\nu}\sigma_x)/\bar{E},\ \varepsilon_{xy} = \tau_{xy}/\bar{G},\ \sigma_z = \nu_{xz}\sigma_x + \nu_{yz}\sigma_y,$$

где для изотропного тела:

$$\bar{E} = \frac{E}{1-\nu^2}, \quad \bar{\nu} = \frac{\nu}{1-\nu}, \quad \bar{G} = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad \left(\nu = \nu_{zy} = \nu_{yx}\right),$$

а для трансверсально-изотропного тела:

$$\bar{E} = \frac{E}{1-\nu_{xz}\nu_{zx}}, \quad \bar{\nu} = \frac{\nu+\nu_{xz}\nu_{zx}}{1-\nu_{xz}\nu_{zx}}, \quad \bar{G} = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad \left(\nu = \nu_{zy} = \nu_{yx}\right);$$

*в)* ***ортотропное тело*** для плосконапряженного состояния и изгиба плиты:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E_x}\sigma_x - \frac{\nu_{xy}}{E_y}\sigma_y, \quad \varepsilon_y = -\frac{\nu_{xy}}{E_x}\sigma_x + \frac{1}{E_y}\sigma_y, \quad \varepsilon_{xy} = \frac{1}{G_{xy}}\tau_{xy};$$

*г)* ***ортотропное тело*** для плоской деформации:

$$\varepsilon_x = \frac{(\sigma_x - \bar{\nu}_{xy}\,\sigma_y)}{\bar{E}_x},\quad \varepsilon_y = \frac{(\sigma_y - \bar{\nu}_{xy}\,\sigma_x)}{\bar{E}_y},\quad \varepsilon_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{\bar{G}_{xy}},\quad \sigma_z = \nu_{xz}\sigma_x + \nu_{yz}\sigma_y,$$

где

$$\bar{E}_x = \frac{E_x}{1-\nu_{xz}\nu_{zx}},\quad \bar{E}_y = \frac{E_y}{1-\nu_{yz}\nu_{zy}},\quad \bar{\nu}_{xy} = \frac{\nu_{xy}+\nu_{xz}\nu_{zy}}{1-\nu_{xz}\nu_{zy}},\quad \bar{\nu}_{yz} = \frac{\nu_{yx}+\nu_{yz}\nu_{zx}}{1-\nu_{yz}\nu_{zx}},\quad \bar{G}_{xy} = G_{xy};$$

*д)* ***анизотропное тело*** для плосконапряженного состояния и изгиба плиты:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E_x}(\sigma_x - \nu_{yx}\sigma_y + \eta_{xy,x}\tau_{xy}),\ \varepsilon_y = \frac{1}{E_y}(-\nu_{xy}\sigma_x + \sigma_y + \eta_{xy,y}\tau_{xy}),\ \varepsilon_{xy} = \frac{1}{G_{xy}}(\eta_{x,xy}\sigma_x + \eta_{y,xy}\sigma_y + \tau_{xy});$$

*е)* ***анизотропное тело*** для плоской деформации:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{\bar{E}_z}(\sigma_x - \bar{\nu}_{yz}\sigma_y + \bar{\eta}_{zy,x}\tau_{xy}),\ \varepsilon_y = \frac{1}{\bar{E}_y}(-\bar{\nu}_{xy}\sigma_x + \sigma_y + \bar{\eta}_{xy,y}\tau_{xy}),$$

$$\varepsilon_{xy} = \frac{1}{\bar{G}_{xy}}(\bar{\eta}_{x,xy}\sigma_x + \bar{\eta}_{y,xy}\sigma_y + \tau_{xy}),\ \sigma_z = \nu_{xz}\sigma_x + \nu_{yz}\sigma_y - \eta_{xy,z}\tau_{xy},$$

где

$$\bar{E}_x = \frac{E_x}{1-\nu_{xz}\nu_{zx}},\quad \bar{E}_y = \frac{E_y}{1-\nu_{yz}\nu_{zy}},\quad \bar{\nu}_{xy} = \frac{\nu_{xy}+\nu_{xz}\nu_{zy}}{1-\nu_{xz}\nu_{zy}},\quad \bar{\nu}_{yz} = \frac{\nu_{yx}+\nu_{yz}\nu_{zx}}{1-\nu_{yz}\nu_{zx}},;$$

$$\bar{\eta}_{xy,x} = \frac{\eta_{xy,x}+\nu_{zx}\eta_{xy,x}}{1-\nu_{xz}\nu_{zx}},\quad \bar{\eta}_{xy,y} = \frac{\eta_{xy,y}+\nu_{zy}\eta_{xy,z}}{1-\nu_{yz}\nu_{zy}},\quad \bar{\eta}_{x,xy} = \frac{\eta_{x,xy}+\nu_{xz}\eta_{z,xy}}{1-\eta_{xy,z}\eta_{z,xy}},$$

$$\bar{\eta}_{y,xy} = \frac{\eta_{y,xy}+\nu_{yz}\eta_{z,xy}}{1-\eta_{xy,x}\eta_{z,xy}},\ \bar{G}_{xy} = \frac{G_{xy}}{1-\eta_{xy,z}\eta_{z,xy}}.$$

Для любого анизотропного материала считаются выполненными условия симметрии:

$$E_x\nu_{xy} = E_y\nu_{yx},\quad E_x\eta_{x,y} = G_{xy}\eta_{xy,x},\quad E_y\eta_{y,xy} = G_{xy}\eta_{xy,y}.$$

### Пластины Рейсснера-Миндлина

В теории тонких пластин Кирхгофа-Лява деформации выражаются через одну неизвестную — прогиб w(x, y).

В теории Рейсснера-Миндлина [5], где не выполняется гипотеза о сохранении нормали к деформированной поверхности, неизвестными являются три функции: прогиб w(x, y) и два угла поворота нормали к поверхности $\beta_x$(x, y) и $\beta_y$(x, y). В выражении потенциальной энергии (2.2.2) имеем:

$$\mathbf{u} = \left[\mathrm{w}, \beta_x, \beta_y\right]^{\mathrm{T}},\quad \boldsymbol{\varepsilon} = \left[\gamma_{xz}, \gamma_{yz}, \chi_{xx}, \chi_{yy}, \chi_{xy}\right]^{\mathrm{T}},\ \boldsymbol{\sigma} = \left[Q_x, Q_y, M_x, M_y, M_{xy}\right]^{\mathrm{T}}.$$

Деформации $\boldsymbol{\varepsilon}$ выражаются через перемещения $\mathbf{u}$:

$$\gamma_{xz} = \frac{\partial \mathrm{w}}{\partial \mathrm{x}} + \beta_x,\quad \gamma_{yz} = \frac{\partial \mathrm{w}}{\partial \mathrm{x}} - \beta_y,$$

$$\chi_{xx} = -\frac{\partial \beta_x}{\partial \mathrm{x}},\ \chi_{yy} = \frac{\partial \beta_y}{\partial \mathrm{y}},\ \chi_{xy} = -\frac{\partial \beta_x}{\partial \mathrm{y}} + \frac{\partial \beta_y}{\partial \mathrm{x}}.$$

Напряжения $\boldsymbol{\sigma}$ от деформаций $\boldsymbol{\varepsilon}$ для изотропного тела зависят следующим образом:

$$Q_x = \mathrm{G\,k\,h}\,\gamma_{xz},\ Q_y = \mathrm{G\,k\,h}\,\gamma_{yz},\ \mathrm{k} = \frac{5}{6},$$

$$M_x = \mathrm{D}\,\chi_{xx},\quad M_y = \mathrm{D}\,\chi_{yy},\quad M_{xy} = \frac{1}{2}(1-\nu)\,\mathrm{D}\,\chi_{xy},$$

$\mathrm{D} = \dfrac{\mathrm{E h}^3}{12\left(1-\nu^2\right)}$ — изгибная жесткость пластины.

### Учет упругого основания

Во всех плоских конечных элементах предусмотрен учет упругого основания:

- для пластин и оболочек вдоль оси $Z_1$. В общем случае реализована двухпараметрическая модель упругого основания, контактирующего с конструкцией (Леонтьева-Власова, Пастернака) [8]. При этом задаются следующие величины:

  $C_1$ — коэффициент, характеризующий работу упругого основания на сжатие;

  $C_{2X}$, $C_{2Y}$ — характеризуют работу упругого основания на сдвиг при расположении площадки сдвига перпендикулярно осям $X_1$ и $Y_1$ местной системы координат элемента соответственно. Для изотропного упругого основания $C_{2X} = C_{2Y}$;

  $C_{2XY}$ — характеризует работу упругого основания на кручение в плоскости $X_1OY_1$ местной системы координат элемента. Для изотропного и ортотропного упругого основания $C_{2XY} = 0$;
- для балок-стенок и оболочек в плоскости элемента задается

  $C_{1uv}$ – коэффициент, характеризующий работу упругого основания в плоскости $X_1Y_1$.

  При отсутствии данных о значении коэффициента постели $C_2$ (его значение равно 0) автоматически реализуется переход к модели упругого основания Винклера с одним коэффициентом постели $C_1$.

### Местные системы координат

На каждом плоском конечном элементе может существовать три различные местные системы координат:

- местная система координат элемента;
- система координат осей ортотропии;
- система координат вычисления усилий и напряжений.

Две последние системы координат по умолчанию совпадают с местной системой координат элемента. Местные системы координат всех элементов определяются порядком нумерации их узлов. Они имеют определенные особенности, связанные с тем, что плита должна быть расположена в плоскости XOY или параллельна ей, а элементы плоской задачи теории упругости, как правило, располагаются в плоскости XOZ (параллельно этой плоскости) и лишь элементы оболочки могут занимать произвольное положение в пространстве.

Все элементы плиты и оболочки имеют местную систему координат $X_1OY_1$, в которой ось $X_1$ проходит от первого узла ко второму. Ось $Y_1$ лежит в плоскости элемента, ортогональна $X_1$ и направлена в сторону третьего узла, а ось $Z_1$ образует с осями $X_1$ и $Y_1$ правую тройку. Для элементов плиты ось $Z_1$ всегда направлена вверх в сторону увеличения координаты Z.

Все элементы плоской задачи теории упругости (за исключением треугольного элемента типа 22) имеют местную систему координат $X_1OZ_1$, в которой ось $X_1$ проходит от первого узла ко второму, а ось $Z_1$ лежит в плоскости элемента и направлена в сторону третьего узла. У элемента типа 22 местная система координат $X_1OZ_1$ совпадает с XOZ.

Для группы элементов возможно задание специальной системы координат выдачи усилий. Эта система определяется направлением вектора, проекция которого на плоскость элемента принимается за ось $X_1$, при этом для элементов пластин и оболочек направление оси $Z_1$ остается неизменным, а ось $Y_1$ дополняет систему до правой тройки. Соответственно, для элементов плоской задачи это оси $Y_1$ и $Z_1$.

### Виды плоских конечных элементов

В систему **SCAD** включены различные плоские конечные элементы, имеющие форму треугольника и четырехугольника. Число узлов в некоторых типах элементов может быть больше чем число вершин. В этом случае дополнительные узлы лежат на **одной** или **нескольких** сторонах элемента и их номера следуют после номеров вершин в произвольном порядке.

#### *Элементы для расчета тонких изгибаемых пластин*

Эти КЭ всегда расположены в плоскости XOY и в их узлах определено по три степени свободы: w — вертикальное перемещение (прогиб), а также $U_X$, $U_Y$ — углы поворота относительно осей X и Y. КЭ могут использоваться в схемах с признаками 3, 5, 8 и 9 и иметь изотропный,

ортотропный или анизотропный материал. Вычисляются моменты $M_X$, $M_Y$, $M_{XY}$ и перерезывающие силы $Q_X$ и $Q_Y$. При задании коэффициента упругого основания $C_1$ вычисляется $R_z$ (см. разд. 13.6).

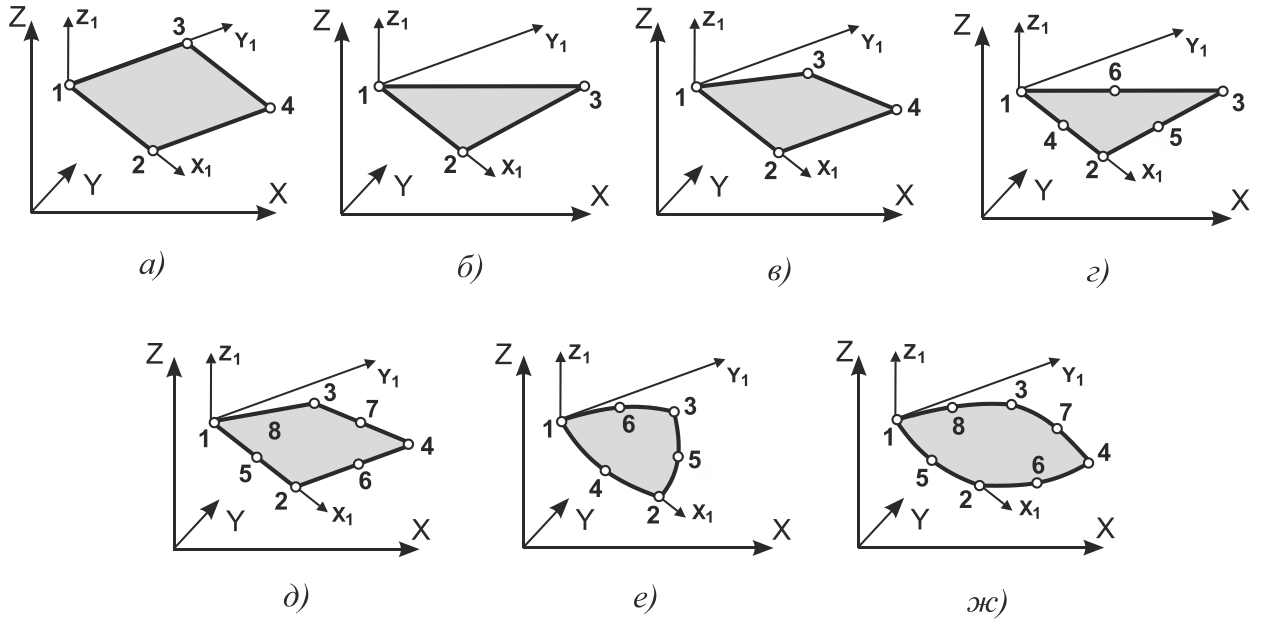



Рис. 3.4-1. *Конечные элементы плиты*

Перечень КЭ для расчета тонких изгибаемых пластин приведен в таблице 3.4-1.

**Таблица 3.4-1.** Типы элементов для расчета тонких плит (теория Кигхгоффа-Лява)

| Тип | Наименование | Число узлов | Порядок нумерации узлов и местные оси | Комментарии |
|---|---|---|---|---|
| 11 | Прямоугольный | 4 | рис. 3.4-1, *а* | полусовместный [18, 22, 23] |
| 12, 14 | Треугольный | 3 | рис. 3.4-1, *б* | несовместный [18, 22, 23] |
| 13 | Прямоугольный | 4 | рис. 3.4-1, *а* | несовместный [28] |
| 15 | Треугольный | 3-6 | рис. 3.4-1, *г* | *SubAreas*[1], *вариант* 1, [24, 23] |
| 16 | Четырехугольный | 4-8 | рис. 3.4-1, *д* | *SubAreas*, *вариант* 2 [25, 23] |
| 18 | Треугольный | 3-6 | рис. 3.4-1, *г* | *SubAreas*, *вариант* 2 [24, 23] |
| 19 | Четырехугольный | 4 | рис. 3.4-1, *в* | *SubAreas*, [25, 23] |
| 20 | Четырехугольный | 4-8 | рис. 3.4-1, *д* | *SubAreas*, [24, 22], *вариант* 1 |

### Изгиб пластин по теории Рейсснера-Миндлина

Данные элементы предназначены для расчета плит средней толщины и реализуют теорию Рейсснера-Миндлина. Они полностью аналогичны элементам для расчета тонких плит с точки зрения задания исходных данных. Отличие их от элементов, приведенных в табл. 3.4-1, только в номере типа — он на 100 больше. Например, элемент 120 — четырехугольный элемент с числом узлов от 4-х до 8-ми, как и элемент 20.

В каждом узле элементов вводится по три степени свободы: w — вертикальное перемещение (прогиб), положительное направление совпадает с направлением оси Z, а также $U_X$ и $U_Y$ углы поворота относительно осей X и Y.

[1] *SubAreas* – метод подобластей: треугольные и четырехугольные элементы разбиваются, соответственно, медианами и диагоналями на треугольники, на каждом из которых используются для аппроксимации полиномы соответствующей степени таким образом, чтобы обеспечивалась совместность. Получаем кусочно-полиномиальные аппроксимации.

**Таблица 3.4-2.** Типы элементов для расчета плит средней толщины (теория Рейсснера-Миндлина)

| Тип | Наименование | Число узлов | Порядок нумерации узлов и местные оси | Коментарии |
|---|---|---|---|---|
| 111 | Прямоугольный | 4 | рис. 3.4-1, *а* | *JIDR4*[1] [89, 23] |
| 112 | Треугольный | 3 | рис. 3.4-1, *б* | *JIDR3* [89, 23] |
| 115 | Треугольный | 3-6 | рис. 3.4-1, *г* | *JIDR3-6* [89, 23] |
| 116 | Четырехугольный | 4-8 | рис. 3.4-1, *ж* | изопараметрический, *JIDR* [89, 23] |
| 118 | Треугольный | 3-6 | рис. 3.4-1, *е* | изопараметрический, *JIDR* [89, 23] |
| 119 | Четырехугольный | 4 | рис. 3.4-2, *б* | *JIDR* [89, 23] |
| 120 | Четырехугольный | 4-8 | рис. 3.4-1, *д* | *JIDR, SubAreas* [89, 23] |
| 512 | Треугольный | 3 | рис. 3.4-1, *б* | модифицированный, *DSG3*[2],[23] |
| 517 | Четырехугольный | 4 | рис. 3.4-1, *в* | изопараметрический, *MITC4*[3] [2, 73] |
| 518 | Треугольный | 3 | рис. 3.4-1, *б* | *DSG3* [74] |

Перечень КЭ для расчета пластин по теории Рейсснера-Миндлина приведен в таблице 3.4-2.

### *Элементы для решения плоскодеформируемой и плосконапряженной задач теории упругости*

Все рассматриваемые в этом разделе элементы позволяют рассчитывать как **плосконапряженные**, так и **плоскодеформируемые** системы (по признаку, который задается при описании жесткостных характеристик элементов).

Существуют следующие группы типов элементов:

- лежащие в плоскости XOZ и имеющие по две степени свободы в узле — U и W, являющиеся тангенциальными перемещениями. КЭ могут использоваться в схемах с признаками 3, 5, 8 и 9;
- могут располагаться в пространстве произвольно и имеют по три степени свободы в узле — U, V и W (типы 23, 24, 26, 27, 28). Степень свободы V введена для стыковки пространственных элементов конструкции. В местной системе координат элемента она равна нулю. КЭ могут использоваться в схемах с признаками 4, 5, 8 и 9;
- лежащие в плоскости XOZ и имеющие по три степени свободы в узле — U и W, и $U_y$ – угол поворота вокруг нормали[4]. КЭ могут использоваться в схемах с признаками 2, 5, 8 и 9.

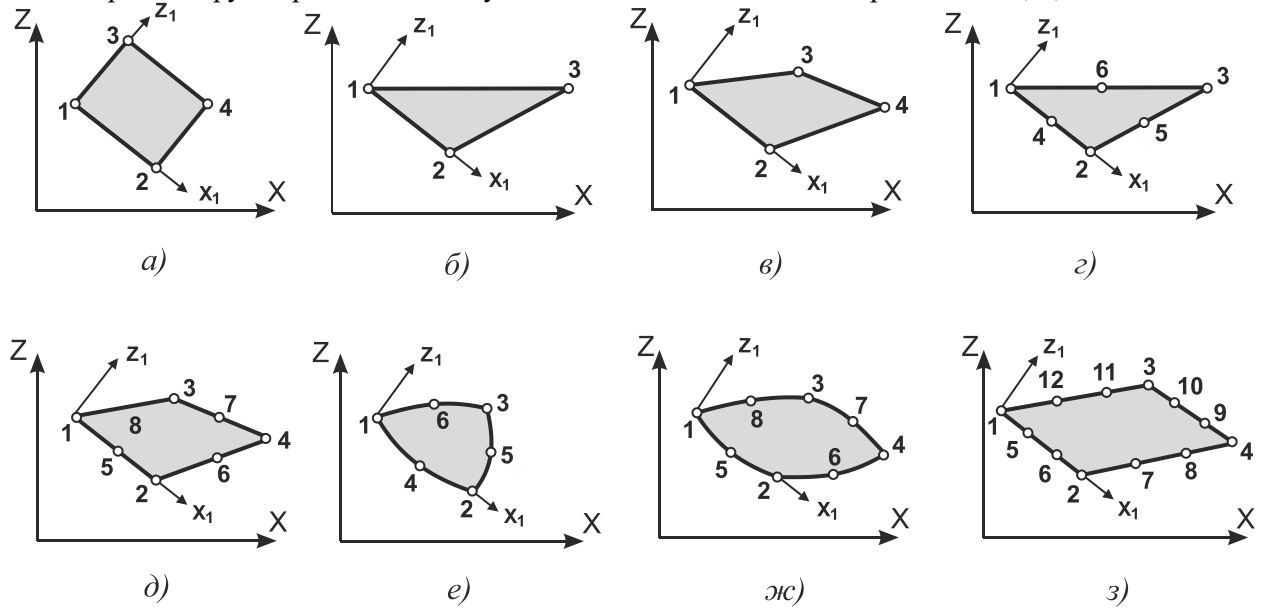



Рис. 3.4-2. *Плоские конечные элементы*

[1] *JIDR, JOINT INTERPOLATION OF DISPLACEMENTS AND ROTATIONS* (Совместная интерполяция перемещений и углов поворота) [89,23].
[2] *DSG, Discrete Shear Gap* [74].
[3] *MITC, Mixed Interpolation of Tensorial Components* [3, 73].
[4] Это может быть как усредненный угол поворота, так и квазивращательная степень свободы [88].

**Таблица 3.4-3.** Типы элементов для плоской задачи теории упругости

| Степени свободы узлов | Тип | Наименование | Число узлов | Порядок нумерации узлов и местные оси | Комментарии |
|---|---|---|---|---|---|
| X, Z | 21 | Прямоугольный | 4 | рис. 3.4-2, *а* | полилинейные функции формы |
| | 22 | Треугольный | 3 | рис. 3.4-2, *б* | линейные функции формы |
| | 25 | Треугольный | 3-6 | рис. 3.4-2, *г* | *SubAreas* [16, 23] |
| | 29 | Четырехугольный | 4-12 | рис. 3.4-2, *з* | *SubAreas* [26, 23] |
| | 30 | Четырехугольный | 4-8 | рис. 3.4-2, *д* | *SubAreas* [26, 23] |
| X, Y, Z | 23 | Прямоугольный | 4 | рис. 3.4-2, *а* | полилинейные функции формы |
| | 24 | Треугольный | 3 | рис. 3.4-2, *б* | линейные функции формы |
| | 26 | Четырехугольный | 4-8 | рис. 3.4-2, *ж* | изопараметрический |
| | 27 | Четырехугольный | 4-8 | рис. 3.4-2, *д* | *SubAreas* [26, 23] |
| | 28 | Треугольный | 3-6 | рис. 3.4-2, *е* | изопараметрический |
| Элементы с вращательными (*DDF*) и квазивращательными степенями свободы (QRDF) | | | | | |
| X, Y, $U_Y$ | 121 | Прямоугольный | 4 | рис. 3.4-2, *а* | *DDF*[1], несовместный [88, 23] |
| | 122 | Треугольный | 3 | рис. 3.4-2, *б* | *DDF*, несовместный [88, 23] |
| | 125 | Треугольный | 3-6 | рис. 3.4-2, *г* | *DDF*, *SubAreas* [88, 23] |
| | 129 | Четырехугольный | 4-8 | рис. 3.4-2, *д* | *DDF*, *SubAreas*, несовместный [88, 23] |
| | 130 | Четырехугольный | 4-8 | рис. 3.4-2, *д* | *DDF*, *SubAreas* [88, 23] |
| | 526 | Четырехугольный | 4 | рис. 3.4-2, *в* | *QRDF*[2], изопараметрический [88, 23] |
| | 527 | Четырехугольный | 4 | рис. 3.4-2, *в* | *QRDF*, *SubAreas* [88, 23] |
| | 528 | Треугольный | 3 | рис. 3.4-2, *б* | *QRDF* [88, 23] |

Все элементы могут иметь изотропный, ортотропный или анизотропный материал, а также трансверсально-изотропный для плоской деформации.

Перечень элементов и их основные свойства приведены в таблице 3.4-3.

Вычисляемые напряжения — $N_X$, $N_Z$, $N_{XZ}$, а также $N_Y$ — при расчете конструкций, находящихся в состоянии плоской деформации. При задании коэффициента упругого основания $C_{uv}$ вычисляются $R_x$ и $R_z$ (см. разд. 13.6).

### Конечные элементы для расчета тонких пологих оболочек

Конечные элементы, предназначенные для расчета тонких пологих оболочек, могут занимать любое положение в пространстве.

В узлах элементов определено по шесть степеней свободы — U, V, W, $U_X$, $U_Y$ и $U_Z$ (три линейных перемещения вдоль и три угла поворота вокруг координатных осей). Степени свободы U, V отвечают мембранным, а W, $U_X$, $U_Y$ — изгибным деформациям.

[1] *DDF – Drilling degrees of freedom* (с вращательными степенями свободы) [23]

[2] *QRDF – Quasi-rotational degrees of freedom* (с квазивращательными степенями свободы) [23]

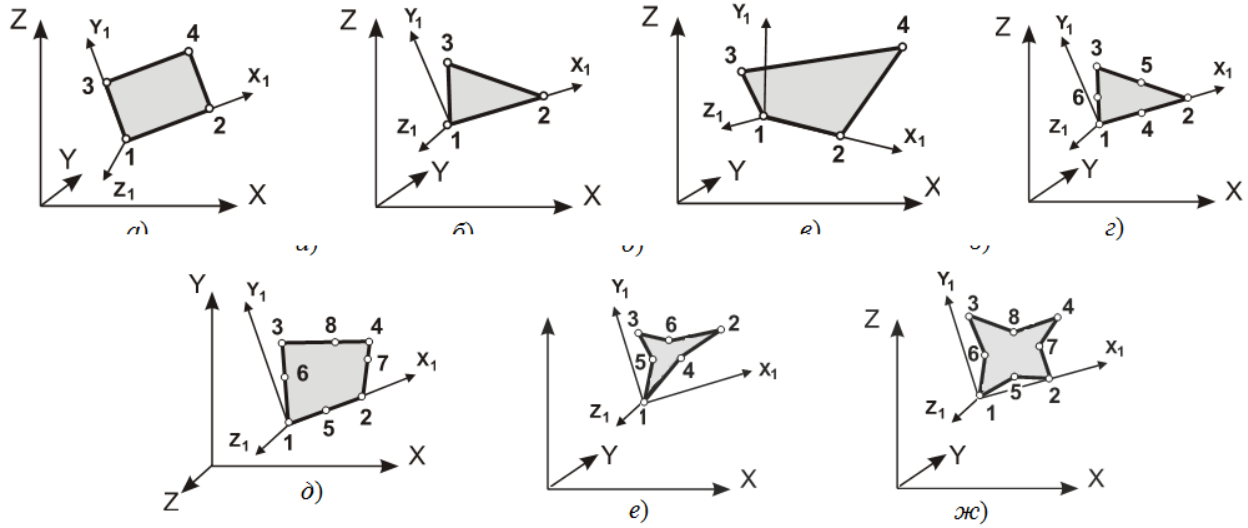


Рис. 3.4-3. *Элементы оболочки*

Существуют следующие группы типов элементов:

- группа, в которой угол поворота $U_Z$ в местной системе координат элемента всегда равен нулю. Он вводится для стыковки элементов, не лежащих в одной плоскости, и необходим для учета пространственной работы конструкции;
- группа, в которой угол $U_Z$ – угол поворота вокруг нормали может быть как усредненный угол поворота, так и квазивращательная степень свободы [88, 23]

Материал — изотропный, ортотропный и анизотропный.

Перечень элементов приведен в таблице 3.4-4.

**Таблица 3.4-4.** Элементы для расчета тонких оболочек (теория Киргхофа-Лява)

| Тип | Наименование | Число узлов | Порядок нумерации узлов и местные оси | Степени свободы | Комментарии |
|---|---|---|---|---|---|
| 41 | Прямоугольный | 4 | рис. 3.4-3, *а* | U, V | полилинейные функции формы |
| | | | | W, $U_X$, $U_Y$ | полусовместный [18, 22, 23] |
| 42 | Треугольный | 3 | рис. 3.4-3, *б* | U, V | линейные функции формы |
| | | | | W, $U_X$, $U_Y$ | несовместный [18, 22, 23] |
| 43 | Прямоугольный | 4 | рис. 3.4-3, *а* | U, V | полилинейные функции формы |
| | | | | W, $U_X$, $U_Y$ | несовместный [28, 23] |
| 44 | Четырехугольный | 4 | рис. 3.4-3, *в* | U, V | *SubAreas* [26, 23] |
| | | | | W, $U_X$, $U_Y$ | *SubAreas* [25, 23] |
| 45 | Треугольный | 3-6 | рис. 3.4-3, *г* | U, V | *SubAreas* [16, 23] |
| | | | | W, $U_X$, $U_Y$ | *SubAreas* [24, 23], вариант 1 |
| 46 | Четырехугольный | 4-8 | рис. 3.4-3, *в* | U, V | *SubAreas* [26, 23] |
| | | | | W, $U_X$, $U_Y$ | *SubAreas*, вариант 2 [25, 23] |
| 48 | Треугольный | 3-6 | рис. 3.4-3, *г* | U, V | *SubAreas* [16, 23] |
| | | | | W, $U_X$, $U_Y$ | *SubAreas*, вариант 2 [24, 23] |
| 50 | Четырехугольный | 4-8 | рис. 3.4-3, *д* | U, V | *SubAreas* [26, 23] |
| | | | | W, $U_X$, $U_Y$ | *SubAreas*, вариант 1 [25, 23] |
| Элементы с вращательными (DDF) и квазивращательными степенями свободы (QRDF) | | | | | |
| 91 | Прямоугольный | 4 | рис. 3.4-3, *а* | U, V, $U_Z$ | *DDF*, несовместный [88, 23] |
| | | | | W, $U_X$, $U_Y$ | полусовместный [18, 22, 23] |
| 92 | Треугольный | 3 | рис. 3.4-3, *б* | U, V, $U_Z$ | *DDF*, несовместный [88, 23] |
| | | | | W, $U_X$, $U_Y$ | несовместный [18, 22, 23] |
| 93 | Прямоугольный | 4 | рис. 3.4-3, *а* | U, V, $U_Z$ | *DDF*, несовместный [88, 23] |
| | | | | W, $U_X$, $U_Y$ | несовместный [28, 23] |
| 94 | Четырехугольный | 4 | рис. 3.4-3, *д* | U, V, $U_Z$ | *DDF*, *SubAreas*, несовместный [88, 23] |
| | | | | W, $U_X$, $U_Y$ | *SubAreas*, [25, 23] |

| Тип | Наименование | Число узлов | Порядок нумерации узлов и местные оси | Степени свободы | Комментарии |
|---|---|---|---|---|---|
| 95 | Треугольный | 3-6 | рис. 3.4-3, *г* | U, V, $U_Z$ | *DDF*, *SubAreas* [88, 23] |
| | | | | W, $U_X$, $U_Y$ | *SubAreas* [24, 23] |
| 96 | Четырехугольный | 4-8 | рис. 3.4-3, *д* | U, V, $U_Z$ | *DDF*, *SubAreas* [88, 22] |
| | | | | W, $U_X$, $U_Y$ | *SubAreas* [25, 23] |
| 97 | Четырехугольный | 4-8 | рис. 3.4-3, *д* | U, V, $U_Z$ | *DDF*, *SubAreas*, несовместный [88, 23] |
| | | | | W, $U_X$, $U_Y$ | *SubAreas* [25, 23] |
| 591 | Прямоугольный | 4 | рис. 3.4-3, *а* | U, V, $U_Z$ | *QRDF4* [88, 23] |
| | | | | W, $U_X$, $U_Y$ | полусовместный [18, 22, 23] |
| 592 | Треугольный | 3 | рис. 3.4-3, *б* | U, V, $U_Z$ | *QRDF3* [88, 23] |
| | | | | W, $U_X$, $U_Y$ | несовместный [18, 22, 23] |
| 593 | Прямоугольный | 4 | рис. 3.4-3, *в* | U, V, $U_Z$ | *QRDF4*, [88, 23] |
| | | | | W, $U_X$, $U_Y$ | несовместный [28, 23] |
| 594 | Четырехугольный | 4 | рис. 3.4-3, *в* | U, V, $U_Z$ | *QRDF4*, *SubAreas* [23] |
| | | | | W, $U_X$, $U_Y$ | *SubAreas* [25, 23] |

Вычисляются напряжения $N_X$, $N_Y$, $N_{XY}$, моменты $M_X$, $M_Y$, $M_{XY}$ и перерезывающие силы $Q_X$ и $Q_Y$. При задании коэффициента упругого основания $C_1$ вычисляется $R_z$, а при задании – $C_{uv}$ вычисляются $R_x$ и $R_y$ (см. разд. 13.6).

В графическом постпроцесоре вычисляются усилия в сечении пластины $SN_X$, $SN_Z$, $SN_{XZ}$

### Конечные элементы для расчета оболочек по теории Рейсснера-Миндлина

Данные элементы предназначены для расчета пологих оболочек с учетом сдвига и реализуют теорию Рейсснера-Миндлина. Они полностью аналогичны элементам для расчета тонких оболочек с точки зрения задания исходных данных.

Перечень элементов приведен в таблице 3.4-5.

**Таблица 3.4-5.** Элементы для расчета оболочек средней толщины (теория Рейсснера-Миндлина)

| Тип | Наименование | Число узлов | Порядок нумерации узлов и местные оси | Степени свободы | Комментарии |
|---|---|---|---|---|---|
| 141 | Прямоугольный | 4 | рис. 3.4-3, *а* | U, V | полилинейные формы |
| | | | | W, $U_X$, $U_Y$ | *JIDR*, несовместный [89, 23] |
| 142 | Треугольный | 3 | рис. 3.4-3, *б* | U, V | линейные функции формы |
| | | | | W, $U_X$, $U_Y$ | *JIDR3* [89, 23] |
| 143 | Четырехугольный изопараметрический | 4 | рис. 3.4-3, *в* | U, V | полилинейные функции формы |
| | | | | W, $U_X$, $U_Y$ | *MITC4*, изопараметрический [3, 73, 23] |
| 144 | Четырехугольный | 4 | рис. 3.4-3, *в* | U, V | *SubAreas* [26, 23] |
| | | | | W, $U_X$, $U_Y$ | *JIDR4*, *SubAreas* [89, 23] |
| 145 | Треугольный | 3-6 | рис. 3.4-3, *г* | U, V | *SubAreas* [26, 23] |
| | | | | W, $U_X$, $U_Y$ | *JIDR*, *SubAreas* [89, 23] |
| 146 | Четырехугольный изопараметрич. | 4-8 | рис. 3.4-3, *д* | U, V | изопараметрический |
| | | | | W, $U_X$, $U_Y$ | *JIDR*, изопараметрический [89, 23] |
| 147 | Треугольный, изопараметрический | 3-6 | рис. 3.4-3, *е* | U, V | изопараметрический |
| | | | | W, $U_X$, $U_Y$ | *JIDR*, изопараметрический [89, 23] |
| 148 | Треугольный | 3 | рис. 3.4-3, *б* | U, V | линейные функции формы |
| | | | | W, $U_X$, $U_Y$ | *DSG3M* [23] |
| 149 | Треугольный | 3 | рис. 3.4-3, *б* | U, V | линейные функции формы |
| | | | | W, $U_X$, $U_Y$ | *DSG3* [74, 23] |
| 150 | Четырехугольный | 4-8 | рис. 3.4-3, *д* | U, V | *JIDR*, *SubAreas* [26, 23] |
| | | | | W, $U_X$, $U_Y$ | *JIDR*, *SubAreas* [89, 23] |
| Элементы с вращательными (DDF) и квазивращательными степенями свободы (QRDF) | | | | | |
| 191 | Прямоугольный | 4 | рис. 3.4-3, *а* | U, V, $U_Z$ | *DDF*, несовместный [88, 23] |
| | | | | W, $U_X$, $U_Y$ | *JIDR* [89, 23] |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 192 | Треугольный | 3 | рис. 3.4-3, *б* | U, V, $U_Z$ | *DDF*, *SubAreas*, [88, 23] |
| | | | | W, $U_X$, $U_Y$ | *JIDR*, *SubAreas* [89, 23] |
| 194 | Четырехугольный | 4 | рис. 3.4-3, *в* | U, V, $U_Z$ | *DDF*, *SubAreas* [88, 23] |
| | | | | W, $U_X$, $U_Y$ | *JIDR*, *SubAreas* [89, 23] |
| 195 | Треугольный | 3-6 | рис. 3.4-3, *г* | U, V, $U_Z$ | *DDF*, *SubAreas* [88, 23] |
| | | | | W, $U_X$, $U_Y$ | *JIDR*, *SubAreas* [89, 23] |
| 196 | Четырехугольный | 4-8 | рис. 3.4-3, *д* | U, V, $U_Z$ | *DDF*, *SubAreas* [88, 23] |
| | | | | W, $U_X$, $U_Y$ | *JIDR*, *SubAreas*, [89, 23] |
| 197 | Четырехугольный | 4-8 | рис. 3.4-3, *д* | U, V, $U_Z$ | *DDF*, несовместный, *SubAreas* [88, 23] |
| | | | | W, $U_X$, $U_Y$ | *JIDR*, *SubAreas*, [89, 23] |
| 542 | Треугольный | 3 | рис. 3.4-3, *б* | U, V, $U_Z$ | *QRDF* [88, 23] |
| | | | | W, $U_X$, $U_Y$ | *JIDR* [89, 23] |
| 543 | Четырехугольный | 4 | рис. 3.4-3, *в* | U, V, $U_Z$ | *QRDF*, изопараметрический [88, 23] |
| | | | | W, $U_X$, $U_Y$ | *MITC4*, изопараметрический [3, 73, 23] |
| 544 | Четырехугольный | 4 | рис. 3.4-3, *а* | U, V, $U_Z$ | *QRDF*, *SubAreas* [88, 23] |
| | | | | W, $U_X$, $U_Y$ | *JIDR*, *SubAreas* [89, 23] |
| 546 | Четырехугольный | 4 | рис. 3.4-3, *в* | U, V, $U_Z$ | *QRDF*, изопараметрический [88, 23] |
| | | | | W, $U_X$, $U_Y$ | *JIDR*, ,изопараметрический [89, 23] |
| 547 | Треугольный | 4 | рис. 3.4-3, *б* | U, V, $U_Z$ | *QRDF* [88, 23] |
| | | | | W, $U_X$, $U_Y$ | *DSG3M* [23] |
| 548 | Треугольный | 3 | рис. 3.4-3, *б* | U, V, $U_Z$ | *QRDF* [88, 23] |
| | | | | W, $U_X$, $U_Y$ | *DSG3* [74, 23] |

## Особенности задания исходной информации для плоских конечных элементов

В зависимости от класса решаемых задач задаются следующие жесткостные характеристики:

- $E(Т/м^2)$, $\nu$ — для изотропного материала;
- $E_1(Т/м^2)$, $E_2(Т/м^2)$, $\nu_{12}$, $\nu_{21}$, $G_{12}(Т/м^2)$ — для ортотропного материала;
- $E_1(Т/м^2)$, $E_2(Т/м^2)$, $\nu_{12}$, $\nu_{21}$, $G_{12}(Т/м^2)$, $\eta_{12,1}$, $\eta_{12,2}$, $\eta_{1,12}$, $\eta_{2,12}$ — для анизотропного материала.

Всегда указывается толщина элемента $\delta$.

Для плоской деформации можно учесть:

- $E_3(Т/м^2)$, $\nu_{13}$, $\nu_{31}$ — трансверсальную изотропию;
- $E_3(Т/м^2)$, $\nu_{13}$, $\nu_{31}$, $\nu_{23}$, $\nu_{32}$ — ортотропию;
- $E_3(Т/м^2)$, $\nu_{13}$, $\nu_{31}$, $\nu_{23}$, $\nu_{32}$, $\eta_{12,3}$, $\eta_{3,12}$ — анизотропию.

При расчете ортотропных и анизотропных пластин необходимо контролировать направления, для которых заданы жесткости. Возможно задание оси ортотропии $X_A$ в общей системе координат вектором или координатами точки. Заданный вектор проецируется на плоскость элемента для определения оси $X_A$ ортотропии. Ось $Y_A$ лежит в плоскости элемента, направлена в сторону третьего узла и ортогональна $X_A$, а тройка $X_A$, $Y_A$, $Z_A$ — правая. Можно изменить направление осей, задав угол поворота местных осей.

Для учета упругого основания задаются $C_1(Т/м^3)$, $C_2(Т/м)$ — коэффициенты постели упругого основания на сжатие и сдвиг соответственно. Допускается учет ортотропии и анизотропии при работе упругого основания на сдвиг.

При использовании результатов, например, в постпроцессоре армирования необходимо задать направление осей вычисления напряжений, когда предполагается известным положение арматуры. Направление задается в общей системе координат, соответственно, приращениями относительно первого узла элемента или координатами точки, лежащей на этой оси. Заданное направление проецируется на плоскость элемента для определения оси $X_N$ вычисления напряжений. Ось $Y_N$ лежит в плоскости элемента, ось $Z_N$ совпадает с осью $Z_1$ и тройка $X_N$,$Y_N$, $Z_N$, — правая. Можно изменить направление осей, задав угол поворота местных осей.

Для всех плоских конечных элементов напряжения (усилия) вычисляются как в центре элементов, так и в их узлах. Управление их выводом описано в главах 7 и 13.

## Нагрузки на плоские конечные элементы

Плоские конечные элементы допускают следующие местные нагрузки:

- сосредоточенные нагрузки, которые задаются в виде значения силы или момента, действующих в заданном направлении и приложенных в точке на поверхности элемента. Нагрузка и координаты точки ее приложения могут задаваться как в местной системе координат элемента, так и в общей системе координат задачи;
- равномерно распределенные нагрузки, которые действуют в заданном направлении и задаются в виде интенсивности силы или момента (величиной силы или момента, приходящейся на единицу площади). Нагрузка действует по всей поверхности элемента, и может задаваться как в местной, так и в общей системах координат;
- собственный вес, который действует вдоль оси Z общей системы координат. При этом обязательно задание удельного веса материала пластин. Указывается коэффициент учета собственного веса элемента;
- трапециевидные нагрузки, которые действуют в заданном направлении и задаются в виде значений интенсивности силы или момента, определенных во всех вершинах элемента. Нагрузка действует по всей поверхности элемента, где она аппроксимируется по линейному или билинейному закону. Направление ее действия может задаваться как в местной, так и в общей системах координат. Интенсивности нагрузки задаются только в вершинах элементов и порядок их задания должен соответствовать порядку нумерации узлов элемента, приведенному при его описании в данном разделе;
- равномерно распределенные по линии нагрузки, которые действуют в заданном направлении на отрезке, соединяющем два узла элемента. Отрезок задается порядковыми номерами узлов в соответствии с описанием элемента и интенсивностью силы или момента (величиной силы или момента, приходящейся на единицу длины). Нагрузка может задаваться как в местной, так и в общей системах координат;
- трапециевидные по линии нагрузки, которые действуют в заданном направлении на отрезке, соединяющем два узла элемента. Отрезок задается порядковыми номерами узлов в соответствии с описанием элемента и интенсивностью силы или момента (величиной силы или момента, приходящейся на единицу длины). Нагрузка может задаваться как в местной, так и в общей системах координат;
- температурное воздействие в виде общего нагрева/охлаждения по отношению к температуре замыкания и/или температурного перепада между «верхней» и «нижней» поверхностями пластины (СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85* (с Изменениями N 1, 2, 3) / Свод правил от 03 декабря 2016 г.)).

Список основных местных нагрузок и правила их задания приведены ниже в таблицах. При этом надо помнить, что при задании нагрузки в общей системе координат игнорируются следующие их проекции на оси местной системы координат элемента:

- нормальная к поверхности элементов типа 21–30, 121-140;
- момент вокруг местной оси $Z_1$ для элементов типа 41–50, 141-150.

В базовой системе единиц нагрузки задаются в следующих единицах измерения: сосредоточенные силы в Т, распределенные по площади силы в Т/м$^2$, распределенные по линии силы в Т/м, сосредоточенные моменты в Тм, распределенные по площади моменты в Тм/м$^2$, распределенные по линии моменты в Тм/м, температура в градусах Цельсия, привязки в м.

**Таблица 3.4-6. Нагрузки на плиты и оболочки в местной системе координат**

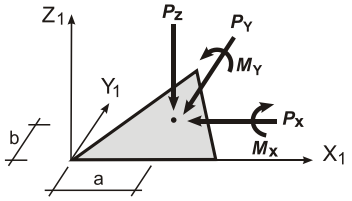
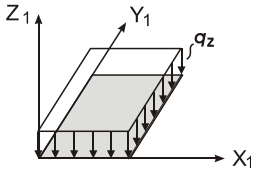
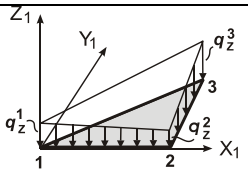
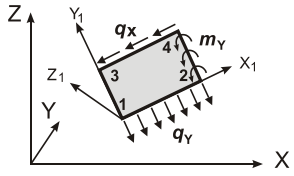
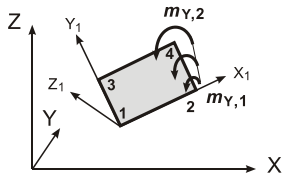
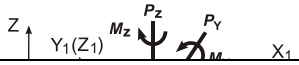
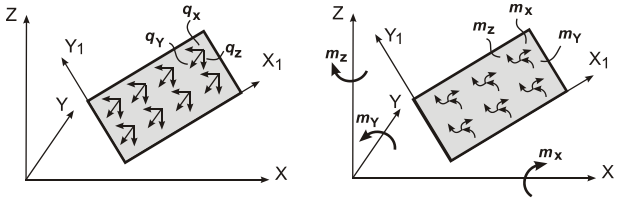
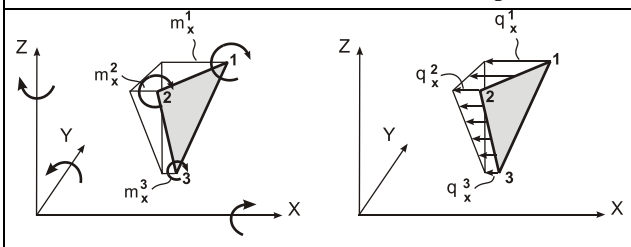
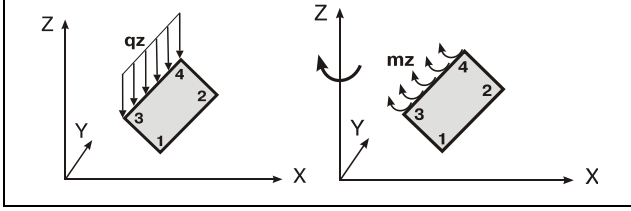
| Схема нагрузки | Направление | Величины | Тип КЭ |
|---|---|---|---|
| **Сосредоточенные силы и моменты** | | | |
|  | вдоль оси $X_1$<br>вдоль оси $Y_1$ | $P_X$, a, b<br>$P_Y$, a, b | оболочки |
| | вдоль оси $Z_1$<br>вокруг оси $X_1$<br>вокруг оси $Y_1$ | $P_Z$, a, b<br>$M_X$, a, b<br>$M_Y$, a, b | плиты<br>оболочки |
| | вокруг оси $Z_1$ | $M_Z$, a, b | 91-97, 191-197,<br>591-599 |
| **Равномерно распределенная нагрузка** | | | |
|  | вдоль оси $X_1$<br>вдоль оси $Y_1$ | $q_X$<br>$q_Y$ | оболочки |
| | вдоль оси $Z_1$<br>вокруг оси $X_1$<br>вокруг оси $Y_1$ | $q_Z$<br>$m_X$<br>$m_Y$ | плиты<br>оболочки |
| | вокруг оси $Z_1$ | $m_Z$ | 91-97, 191-197<br>591-599 |
| **Трапециевидная нагрузка** | | | |
|  | вдоль оси X<br>вдоль оси Y | $q_X^1, q_X^2, \dots, q_X^n$<br>$q_Y^1, q_Y^2, \dots, q_Y^n$ | оболочки |
| | вдоль оси Z<br>вокруг оси X<br>вокруг оси Y | $q_Z^1, q_Z^2, \dots, q_Z^n$<br>$m_X^1, m_X^2, \dots, m_X^n$<br>$m_Y^1, m_Y^2, \dots, m_Y^n$ | плиты<br>оболочки |
| | вокруг оси Z | $m_Z^1, m_Z^2, \dots, m_Z^n$ | 91-97, 191-197,<br>591-599 |
| **Равномерно распределенная по линии**, соединяющей два узла элемента | | | |
|  | вдоль оси $X_1$<br>вдоль оси $Y_1$ | $n_1\ n_2\ q_X$ [1]<br>$n_1\ n_2\ q_Y$ | оболочки |
| | вдоль оси $Z_1$<br>вокруг оси $X_1$<br>вокруг оси $Y_1$ | $n_1\ n_2\ q_Z$<br>$n_1\ n_2\ m_X$<br>$n_1\ n_2\ m_Y$ | плиты<br>оболочки |
| | вокруг оси $Z_1$ | $n_1\ n_2\ m_Z$ | 91-97, 191-197,<br>591-599 |
| **Трапециевидная нагрузка по линии**, соединяющей два узла элемента | | | |
|  | вдоль оси $X_1$<br>вдоль оси $Y_1$ | $n_1\ n_2\ q_{X,1}\ q_{X,2}$<br>$n_1\ n_2\ q_{Y,1}\ q_{Y,2}$ | оболочки |
| | вдоль оси $Z_1$<br>вокруг оси $X_1$<br>вокруг оси $Y_1$ | $n_1\ n_2\ q_{Z,1}\ q_{Z,2}$<br>$n_1\ n_2\ m_{X,1}\ m_{X,2}$<br>$n_1\ n_2\ m_{Y,1}\ m_{Y,2}$ | плиты<br>оболочки |
| | вокруг оси $Z_1$ | $n_1\ n_2\ m_{Z,1}\ m_{Z,2}$ | 91-97, 191-197,<br>591-599 |

**Таблица 3.4-7. Нагрузки на плиты и оболочки в общей системе координат**

| Схема нагрузки | Направление | Величины | Тип КЭ |
|---|---|---|---|
| **Сосредоточенная нагрузка** с привязками в местной системе координат | | | |
|  | вдоль оси X<br>вдоль оси Y | $P_X$, a, b<br>$P_Y$, a, b | оболочки |

[1] $n_1$ , $n_2$ — порядковые номера узлов, определенные при описании элемента.

| Схема нагрузки | Направление | Величины | Тип КЭ |
|---|---|---|---|
| | вдоль оси Z<br>вокруг оси X<br>вокруг оси Y | $P_Z$, a, b<br>$M_X$, a, b<br>$M_Y$, a, b | плиты<br>оболочки |
| | вокруг оси Z | $M_Z$, a, b | оболочки |
| **Равномерно распределенная нагрузка** | | | |
|  | вдоль оси X<br>вдоль оси Y | $q_X$<br>$q_Y$ | оболочки |
| | вдоль оси Z<br>вокруг оси X<br>вокруг оси Y | $q_Z$<br>$m_X$<br>$m_Y$ | плиты<br>оболочки |
| | вокруг оси Z | $m_Z$ | оболочки |
| **Трапециевидная нагрузка** | | | |
|  | вдоль оси X<br>вдоль оси Y | $q_X^1, q_X^2, \ldots, q_X^n$<br>$q_Y^1, q_Y^2, \ldots, q_Y^n$ | оболочки |
| | вдоль оси Z<br>вокруг оси X<br>вокруг оси Y | $q_Z^1, q_Z^2, \ldots, q_Z^n$<br>$m_X^1, m_X^2, \ldots, m_X^n$<br>$m_Y^1, m_Y^2, \ldots, m_Y^n$ | плиты<br>оболочки |
| | вокруг оси Z | $m_Z^1, m_Z^2, \ldots, m_Z^n$ | оболочки |
| **Равномерно распределенная нагрузка по линии**, соединяющей два узла элемента | | | |
|  | вдоль оси X<br>вдоль оси Y | $n_1\ n_2\ q_X$<br>$n_1\ n_2\ q_Y$ | оболочки |
| | вдоль оси Z<br>вокруг оси X<br>вокруг оси Y | $n_1\ n_2\ q_Z$<br>$n_1\ n_2\ m_X$<br>$n_1\ n_2\ m_Y$ | плиты<br>оболочки |
| | вокруг оси Z | $n_1\ n_2\ m_Z$ | оболочки |

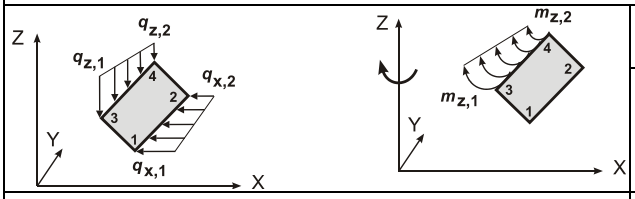
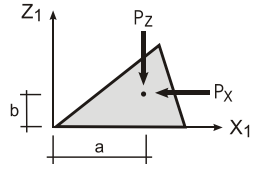
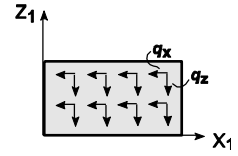
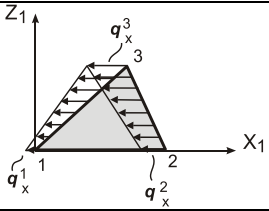
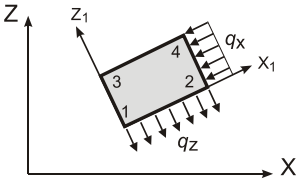
| Схема нагрузки | Направление | Величины | Тип КЭ |
|---|---|---|---|
| **Трапециевидная нагрузка по линии**, соединяющей два узла элемента | | | |
|  | вдоль оси X<br>вдоль оси Y | $n_1\ n_2\ q_{X,1}\ q_{X,2}$<br>$n_1\ n_2\ q_{Y,1}\ q_{Y,2}$ | оболочки |
| | вдоль оси Z<br>вокруг оси X<br>вокруг оси Y | $n_1\ n_2\ q_{Z,1}\ q_{Z,2}$<br>$n_1\ n_2\ m_{X,1}\ m_{X,2}$<br>$n_1\ n_2\ m_{Y,1}\ m_{Y,2}$ | плиты<br>оболочки |
| | вокруг оси Z | $n_1\ n_2\ m_{Z,1}\ m_{Z,2}$ | оболочки |

**Таблица 3.4-8**

**Нагрузки в местной системе координат на элементы для для расчета плосконапряженного и плоскодеформированного состояний**

| Схема нагрузки | Направление | Величины | Тип КЭ |
|---|---|---|---|
| **Сосредоточенная нагрузка** | | | |
|  | вдоль оси $X_1$<br>вдоль оси $Z_1$ | $P_X, a, b$<br>$P_Z, a, b$ | 21-30,121-130,<br>521-530 |
| | вокруг оси Y | $M_Y, a, b$ | 121-130, 521-530 |
| **Равномерно распределенная нагрузка** | | | |
|  | вдоль оси $X_1$<br>вдоль оси $Z_1$ | $q_X$<br>$q_Z$ | 21-30,121-130,<br>521-530 |
| | вокруг оси Y | $m_Y$ | 121-130, 521-530 |
| **Трапециевидная нагрузка** | | | |
|  | вдоль оси $X_1$<br>вдоль оси $Z_1$ | $q_X^1, q_X^2, \dots, q_X^n$<br>$q_Z^1, q_Z^2, \dots, q_Z^n$ | 21-30,121-130,<br>521-530 |
| | вокруг оси Y | $m_Y^1, m_Y^2, \dots, m_Y^n$ | 121-130, 521-530 |
| **Равномерно распределенная нагрузка по линии**, соединяющей два узла элемента | | | |
|  | вдоль оси $X_1$<br>вдоль оси $Z_1$ | $n_1\ n_2\ q_X$<br>$n_1\ n_2\ q_Z$ | 21-30,121-130,<br>521-530 |
| | вокруг оси Y | $n_1\ n_2\ m_Y$ | 121-130, 521-530 |

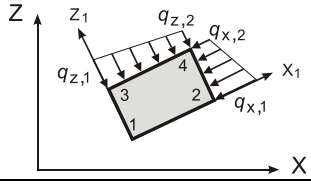
| Схема нагрузки | Направление | Величины | Тип КЭ |
|---|---|---|---|
| **Трапециевидная нагрузка по линии**, соединяющей два узла элемента | | | |
|  | вдоль оси $X_1$<br>вдоль оси $Z_1$ | $n_1\ n_2\ q_{X,1}\ q_{X,2}$<br>$n_1\ n_2\ q_{Z,1}\ q_{Z,2}$ | 21-30,121-130,<br>521-530 |
| | вокруг оси Y | $n_1\ n_2\ m_{Y,1}\ m_{Y,2}$ | 121-130, 521-530 |

**Таблица 3.4-9**

**Нагрузки в общей системе координат на элементы для расчета плосконапряженного и плоскодеформированного состояний**

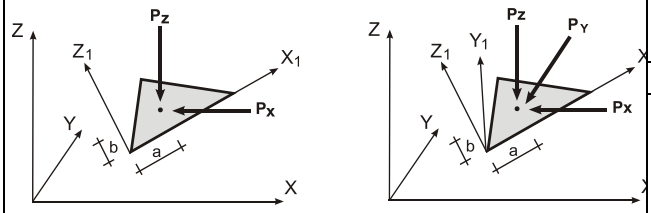
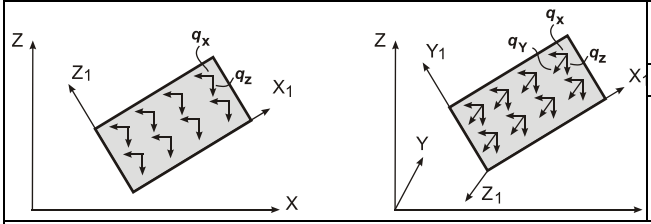
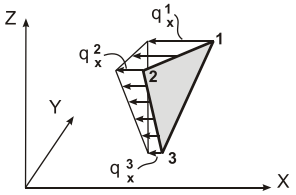
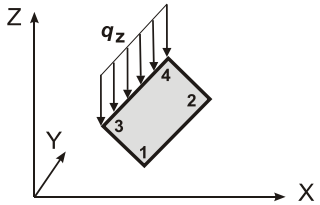
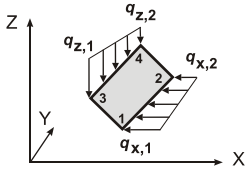
| Схема нагрузки | Направление | Величины | Тип КЭ |
|---|---|---|---|
| **Сосредоточенная нагрузка** с привязками в местной системе координат | | | |
|  | вдоль оси X<br>вдоль оси Z | $P_X$, a, b<br>$P_Z$, a, b | 21–30, 121-130,<br>521-530 |
| | вдоль оси Y | $P_Y$, a, b | 23, 24, 26, 27, 28 |
| | вокруг оси Y | $M_Y$, a, b | 121-130, 521-530 |
| **Равномерно распределенная нагрузка** | | | |
|  | вдоль оси X<br>вдоль оси Z | $q_X$<br>$q_Z$ | 21–30, 121-130,<br>521-530 |
| | вдоль оси Y | $q_Y$ | 23, 24, 26, 27, 28 |
| | вокруг оси Y | $m_Y$ | 121-130, 521-530 |
| **Трапециевидная нагрузка** | | | |
|  | вдоль оси X<br>вдоль оси Z | $q_X^1, q_X^2, \ldots, q_X^n$<br>$q_Z^1, q_Z^2, \ldots, q_Z^n$ | 21–30, 121-130,<br>521-530 |
| | вдоль оси Y | $q_Y^1, q_Y^2, \ldots, q_Y^n$ | 23, 24, 26, 27, 28 |
| | вокруг оси Y | $m_Y^1, m_Y^2, \ldots, m_Y^n$ | 121-130, 521-530 |
| **Равномерно распределенная нагрузка по линии**, соединяющей два узла элемента | | | |
|  | вдоль оси X<br>вдоль оси Z | $n_1\ n_2\ q_X$<br>$n_1\ n_2\ q_Z$ | 21–30, 121-130,<br>521-530 |
| | вдоль оси Y | $n_1\ n_2\ q_Y$ | 23, 24, 26, 27, 28 |
| | вокруг оси Y | $n_1\ n_2\ m_Y$ | 121-130, 521-530 |
| **Трапециевидная нагрузка по линии**, соединяющей два узла элемента | | | |
|  | вдоль оси X<br>вдоль оси Z | $n_1\ n_2\ q_{X,1}\ q_{X,2}$<br>$n_1\ n_2\ q_{Z,1}\ q_{Z,2}$ | 21–30, 121-130,<br>521-530 |
| | вдоль оси Y | $n_1\ n_2\ q_{Y,1}\ q_{Y,2}$ | 23, 24, 26, 27, 28 |
| | вокруг оси Y | $n_1\ n_2\ m_{Y,1}\ m_{Y,2}$ | 121-130, 521-530 |

**Таблица 3.4-10**

**Температурная нагрузка на плоские элементы**

| Тип КЭ | Воздействие | Величины | Примечания |
|---|---|---|---|
| плиты оболочки | Разность температур на верхней и нижней поверхностях. | $\Delta t, [\alpha]$ | $\Delta t$ — разность температур на верхней и нижней поверхностях;<br>$\alpha$ — коэффициент линейного расширения материала;<br>$\alpha_x$, $\alpha_y$ — коэффициенты линейного расширения, соответственно, по осям $X_1$ или $Y_1$ местной системы координат элемента, в которой заданы жесткостные характеристики. Позволяют учесть ортотропию материала;<br>t — увеличение (уменьшение) температуры среднего слоя пластины по отношению к нормальным условиям эксплуатации (температуре замыкания (СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85* (с Изменениями N 1, 2, 3) / Свод правил от 03 декабря 2016 г.)). |
| | | $\Delta t, [\alpha_X]$ | |
| | | $\Delta t, [\alpha_Y]$ | |
| | | $\Delta t, [\alpha_X, \alpha_Y]$ | |
| 21-30 121-130, 521-530 оболочки | Общий нагрев (охлаждение) по отношению к температуре замыкания. | $t, [\alpha]$ | |
| | | $t, [\alpha_X]$ | |
| | | $t, [\alpha_Y]$ | |
| | | $t, [\alpha_X, \alpha_Y]$ | |
| оболочки | Общий нагрев (охлаждение) по отношению к температуре замыкания и одновременно разность температур на верхней и нижней поверхностях. | $t, \Delta t, [\alpha]$ | |
| | | $t, \Delta t, [\alpha_X]$ | |
| | | $t, \Delta t, [\alpha_Z]$ | |
| ***Замечание:*** При расчете используются коэффициенты температурного расширения, заданные в жесткостных характеристиках соответствующего элемента. При конвертации файлов предыдущих версий используется коэффициент температурного расширения, заданный при описании нагрузки. При этом выдается соответствующее предупреждение. Задание коэффициентов температурного расширения для конкретной нагрузки возможно лишь при подготовке данных в текстовом формате. | | | |

## 3.5. Конечные элементы для решения пространственной задачи теории упругости (объемные элементы)

### Общие сведения

Эти элементы предназначены для определения напряженно-деформированного состояния континуальных объектов и массивных пространственных конструкций. Для описания свойств материала используются следующие обозначения:

$\varepsilon_x$, $\varepsilon_y$, $\varepsilon_z$, $\gamma_{xy}$, $\gamma_{xz}$, $\gamma_{yz}$ — относительные линейные и угловые деформации;

$\sigma_x$, $\sigma_y$, $\sigma_z$, $\tau_{xy}$, $\tau_{xz}$, $\tau_{yz}$ — нормальные и касательные напряжения;

$E_x$, $E_y$, $E_z$ — модули Юнга по главным направлениям упругости (в случае их равенства для всех направлений используется обозначение E);

$G_{xy}$, $G_{xz}$, $G_{yz}$ — модули сдвига, характеризующие изменение угла между главными направлениями (в случае их равенства для всех направлений используется обозначение G);

$\nu$, $\nu_{ij}$ — коэффициенты Пуассона, характеризующие поперечное сокращение при сжатии или расширение при растяжении в направлении осей координат. Первый индекс показывает направление деформации, второй — направление действия силы.

В системе **SCAD** реализованы следующие варианты упругих свойств материала:

***изотропное тело:***

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}\left(\sigma_x - \nu\sigma_y - \nu\sigma_z\right),\ \varepsilon_y = \frac{1}{E}\left(\sigma_y - \nu\sigma_x - \nu\sigma_z\right),\ \varepsilon_z = \frac{1}{E}\left(\sigma_z - \nu\sigma_x - \nu\sigma_y\right),$$

$$\gamma_{xy} = \frac{1}{G}\tau_{xy};\ \ \gamma_{yz} = \frac{1}{G}\tau_{yz};\ \ \gamma_{zx} = \frac{1}{G}\tau_{zx};$$

***трансверсально-изотропное и ортотропное тело:***

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E_x}\sigma_x - \frac{\nu_{12}}{E_y}\sigma_y - \frac{\nu_{13}}{E_z}\sigma_z,\ \varepsilon_y = -\frac{\nu_{21}}{E_x}\sigma_x + \frac{1}{E_y}\sigma_y - \frac{\nu_{23}}{E_z}\sigma_z,\ \varepsilon_z = -\frac{\nu_{31}}{E_x}\sigma_x - \frac{\nu_{32}}{E_y}\sigma_y + \frac{1}{E_z}\sigma_z,$$

$$\varepsilon_{xy} = \frac{1}{G_{xy}}z_{xy},\ \ \varepsilon_{xz} = \frac{1}{G_{xz}}z_{xz},\ \ \varepsilon_{yz} = \frac{1}{G_{yz}}z_{yz}.$$

Для трансверсально-изотропного тела $E_x = E_y = E$, $\nu_{12} = \nu_{21}$, $G_{xz} = G_{yz}$. Во всех случаях считаются выполненными условия симметрии:

$$E_1\nu_{12} = E_2\nu_{21},\ E_1\nu_{13} = E_3\nu_{31},\ E_2\nu_{23} = E_3\nu_{32}.$$

В каждом узле конечных элементов имеется по три степени свободы: u, v, w — перемещения, соответственно, по осям x, y, z. При построении конечных элементов перемещения (u, v, w) аппроксимировались функциями следующего вида: линейными — для тетраэдра, линейными или билинейными по каждому из направлений — для треугольной призмы и параллелепипеда [15], дробно-рациональными — для изопараметрических элементов [16, 19, 23].

## Местные системы координат

На каждом конечном элементе для решения пространственной задачи теории упругости может существовать три различные местные системы координат, которые в общем случае совпадают:

- местная система координат элемента;
- система координат осей ортотропии;
- система координат вычисления усилий и напряжений.

Две последние системы координат по умолчанию совпадают с местной системой координат элемента.

Конечные элементы типа 31 и 33 имеют местную систему координат, в которой ось $X_1$ проходит от первого узла ко второму. Ось $Y_1$ лежит в плоскости, образованной первыми тремя узлами, ортогональна $X_1$ и направлена в сторону третьего узла. Ось $Z_1$ образует с $X_1$ и $Y_1$ правую тройку. Для остальных элементов местная система координат совпадает с общей.

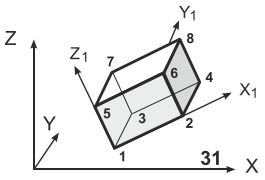
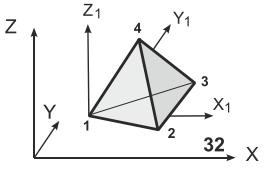
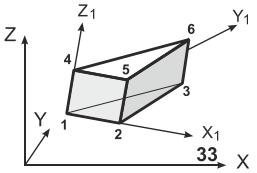
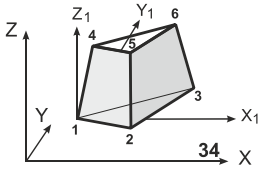
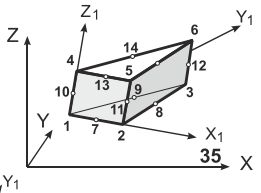
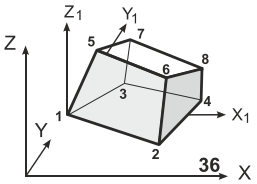
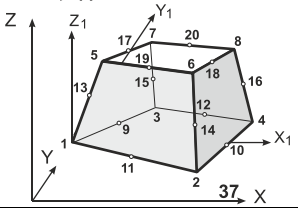
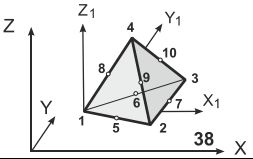
Для группы элементов возможно задание специальной системы координат выдачи усилий. Эта система определяется направлением осей $X_N$ и $Y_N$, а ось $Z_N$ дополняет систему до правой тройки.

## Набор конечных элементов

КЭ для решения пространственной задачи теории упругости могут использоваться в схемах с признаками 4, 5, 8 и 9. В них вычисляются напряжения: $N_X$, $N_Y$, $N_Z$, $T_{XY}$, $T_{XZ}$, $T_{YZ}$ (см. разд. 13.6).

В таблице 3.5-1 перечислены включенные в **SCAD** конечные элементы и приведены их местные системы координат.

**Таблица 3.5-1**

| Тип КЭ | Наименование | Нумерация узлов и местные оси |
|---|---|---|
| 31 | Параллелепипед |  |
| 32 | Тетраэдр |  |
| 33 | Трехгранная призма |  |
| 34 | Пространственный изопараметрический шестиузловой конечный элемент |  |
| 35 | Пятнадцатиузловая трехгранная призма |  |
| 36 | Пространственный изопараметрический восьмиузловой конечный элемент |  |
| 37 | Пространственный изопараметрический двадцатиузловой конечный элемент |  |
| 38 | Десятиузловая пирамида |  |
| Номера узлов, лежащие на ребрах элементов, задаются в произвольном порядке после номеров узлов в вершинах. | | |

## Особенности задания исходной информации для объемных конечных элементов

В зависимости от класса решаемых задач задаются следующие жесткостные характеристики:

$E(Т/м^2)$ , $\nu$ — для изотропного материала;

$E(Т/м^2)$, $E_3(Т/м^2)$, $\nu_{12}$, $\nu_{13}$, $G_{13}(Т/м^2)$ — для трансверсально-изотропного материала;

$E_1(Т/м^2)$, $E_2(Т/м^2)$, $E_3(Т/м^2)$, $\nu_{12}$, $\nu_{21}$, $\nu_{13}$, $\nu_{31}$, $\nu_{23}$, $\nu_{32}$, $G_{12}(Т/м^2)$, $G_{13}(Т/м^2)$, $G_{23}(Т/м^2)$ — для ортотропного материала.

При расчете тел из ортотропных и анизотропных материалов необходимо контролировать направления, для которых заданы жесткости. Возможно их задание в общей системе координат следующими способами:

- $\Delta X_1$, $\Delta Y_1$, $\Delta Z_1$, $\Delta X_2$, $\Delta Y_2$, $\Delta Z_2$ — проекциями на оси основной системы координат двух векторов, определяющих направления осей ортотропии $X_A$ и $Y_A$. Ось $Z_A$ ортогональна к ним, и тройка $X_A$, $Y_A$, $Z_A$ — правая;
- в цилиндрической системе координат, когда задаются $X_C$, $Y_C$, $Z_C$ — координаты точки, через которую проходит ось цилиндра и $\Delta X$, $\Delta Y$, $\Delta Z$ — вектор, определяющий направление оси цилиндра. Ось $X_A$ ортогональна оси цилиндра и проходит через точку, лежащую на ней. Ось $Z_A$ лежит на образующей цилиндра;
- в сферической системе координат, когда задаются $X_C$,$Y_C$, $Z_C$ — координаты центра сферы и $\Delta X$, $\Delta Y$, $\Delta Z$ — вектор, определяющий направление оси $Y_A$. Ось $X_A$ проходит от первого узла элемента к центру сферы.

Можно изменить направление осей, задав углы Эйлера поворота местных осей.

При использовании результатов необходимо задать направление осей вычисления напряжений. Их задание в общей системе координат полностью идентично заданию осей ортотропии.

Для всех объемных конечных элементов напряжения (усилия) вычисляются как в центре элементов, так и в их узлах. Управление их выводом описано в главах 7 и 13.

## Нагрузки на объемные конечные элементы

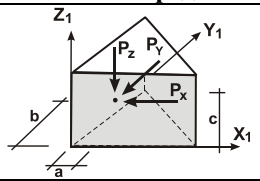
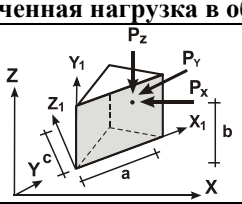
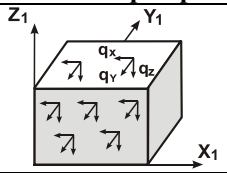
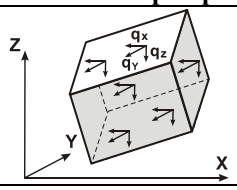
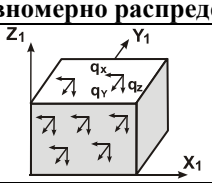
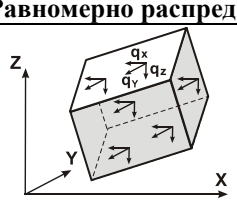
Конечные элементы для решения пространственной задачи теории упругости допускают следующие нагрузки:

- сосредоточенные нагрузки, которые задаются в виде значений сил, действующих в заданном направлении и приложенных к точке элемента. Нагрузка и координаты точки ее приложения могут задаваться как в местной системе координат элемента, так и в общей системе координат задачи;
- равномерно распределенные нагрузки, которые действуют в заданном направлении и задаются в виде интенсивности силы (величиной силы, приходящейся на единицу объема). Нагрузка действует по всему объему элемента и может задаваться как в местной, так и в общей системах координат;
- собственный вес, который действует вдоль оси Z общей системы координат. Указывается удельный вес материала и коэффициент учета собственного веса элемента;
- трапециевидные нагрузки на конечные элементы типа 31 и 33, которые действуют в заданном направлении и задаются в виде значений интенсивности силы, определенных во всех вершинах элемента. Нагрузка действует по всему объему элемента, где она аппроксимируется по линейному закону в каждом из направлений. Направление ее действия может задаваться как в местной, так и в общей системах координат. Порядок задания значений интенсивности нагрузки должен соответствовать порядку нумерации узлов элемента, приведенному при его описании в данном разделе;
- равномерно распределенные по грани элемента нагрузки, которые действуют в заданном направлении. Они задаются порядковыми номерами граней, приведенными при описании элемента в данном разделе (см. рис. 3.5-1), и интенсивностью силы или момента (величиной силы или момента, приходящейся на единицу площади). Нагрузка может задаваться как в местной, так и в общей системах координат;
- температурное воздействие в виде общего нагрева (охлаждения) по отношению к температуре замыкания.

В базовой системе единиц нагрузки задаются в следующих единицах измерения: сосредоточенные силы в Т, распределенные по площади силы в Т/м$^2$, распределенные по объему в Т/м$^3$, температура в градусах Цельсия, привязки в м.

Основные местные нагрузки для объемных элементов приведены в таблице 3.5-2.

**Таблица 3.5-2**

| Схема нагрузки | Направление | Величины | Тип КЭ |
|---|---|---|---|
| **Сосредоточенная нагрузка** в местной системе координат | | | |
|  | вдоль оси $X_1$<br>вдоль оси $Y_1$<br>вдоль оси $Z_1$ | $P_X$, *a*, *b*, *c*<br>$P_Y$, a, b, *c*<br>$P_Z$, *a*, *b*, *c* | 31, 33 |
| **Сосредоточенная нагрузка в общей системе координат**, привязки в местной системе координат | | | |
|  | вдоль оси X<br>вдоль оси Y<br>вдоль оси Z | $P_X$, *a*, *b*, *c*<br>$P_Y$, *a*, *b*, *c*<br>$P_Z$, *a*, *b*, *c* | 31, 33 |
| **Равномерно распределенная нагрузка** в местной системе координат | | | |
|  | вдоль оси $X_1$<br>вдоль оси $Y_1$<br>вдоль оси $Z_1$ | $q_X$<br>$q_Y$<br>$q_Z$ | 31, 33 |
| **Равномерно распределенная** нагрузка в общей системе координат | | | |
|  | вдоль оси X<br>вдоль оси Y<br>вдоль оси Z | $q_X$<br>$q_Y$<br>$q_Z$ | 31–40 |
| **Равномерно распределенная нагрузка по грани** в местной системе координат | | | |
|  | вдоль оси $X_1$<br>вдоль оси $Y_1$<br>вдоль оси $Z_1$ | $q_X$ $n$[1]<br>$q_Y$ $n$<br>$q_Z$ $n$ | 31, 33 |
| **Равномерно распределенная нагрузка по грани** в общей системе координат | | | |
|  | вдоль оси X<br>вдоль оси Y<br>вдоль оси Z | $q_X$ $n$<br>$q_Y$ $n$<br>$q_Z$ $n$ | 31–40 |

[1] *n* — номер грани элемента (см. рис. 3.5-1)

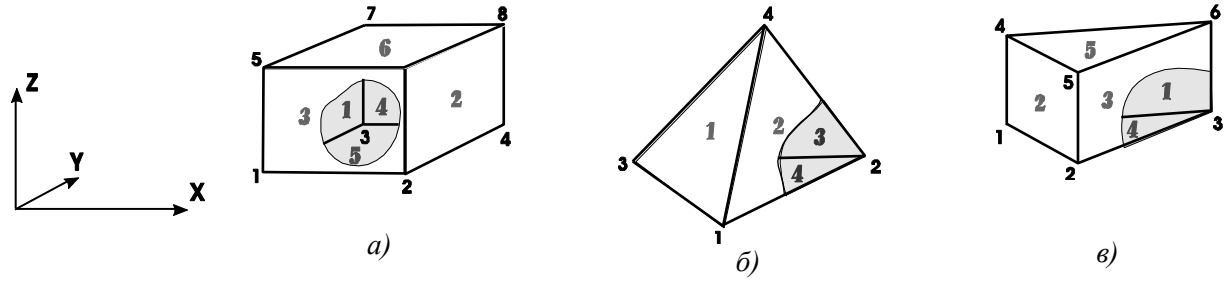



Рис. 3.5-1. *Нумерация граней приложения нагрузки в объемных элементах*

**Температурная нагрузка на объемные элементы** **Таблица 3.5-3**

| Воздействие | Величины | Примечания |
|---|---|---|
| Общий нагрев (охлаждение) по отношению к температуре замыкания. | t, [$\alpha$] | t — увеличение (уменьшение) температуры среднего слоя пластины по отношению к нормальным условиям эксплуатации (температуре замыкания);<br>$\alpha$ — коэффициент линейного расширения материала;<br>$\alpha_X$, $\alpha_Y$, $\alpha_Z$ — коэффициенты линейного расширения, соответственно, по осям $X_1$ или $Y_1$ местной системы координат элемента, в которой заданы жесткостные характеристики. Позволяют учесть ортотропию материала. |
| | t, [$\alpha_X$] | |
| | t, [$\alpha_Y$] | |
| | t, [$\alpha_Z$] | |
| | $\Delta$t, [$\alpha_X$, $\alpha_Y$, $\alpha_Z$] | |
| ***Замечание:*** При расчете используются коэффициенты температурного расширения, заданные в жесткостных характеристиках соответствующего элемента. При конвертации файлов предыдущих версий используется коэффициент температурного расширения, заданный при описании нагрузки. При этом выдается соответствующее предупреждение. Задание коэффициентов температурного расширения для конкретной нагрузки возможно лишь при подготовке данных в текстовом формате. | | |

## 3.6. Универсальные конечные элементы для решения осесимметричной задачи теории упругости

### Общие сведения

Эти элементы предназначены для определения напряженно-деформированного состояния тел вращения (осесимметричные твердые тела) из однородного (по направлению любой из осей r, Z элемента) изотропного, трансверсально-изотропного или ортотропного линейно-упругого материала, находящихся под воздействием осесимметричной нагрузки [58].

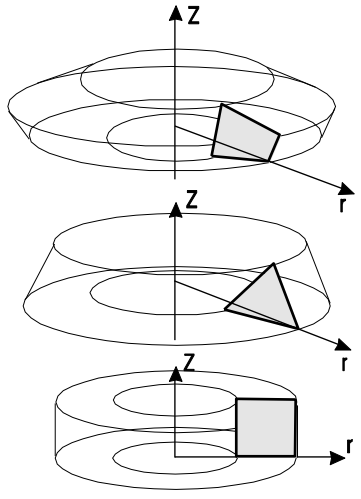



Рис. 3.6-1.

При осесимметричной деформации напряженное состояние в любом сечении по оси симметрии тела рассматривается как функция лишь радиуса r и высоты Z и определяется двумя компонентами перемещений. Такие сечения показаны на рис. 3.6-1. При этом возможно рассмотрение одного из следующих случаев упругой симметрии:полная симметрия (изотропное тело);

- плоскость изотропии (трансверсально-изотропное тело);
- три плоскости упругой симметрии (ортотропно-анизотропное или ортотропное тело).

Опишем их, используя следующие обозначения:

- $\varepsilon_r$, $\varepsilon_z$, $\varepsilon_\theta$, $\gamma_{rz}$ — относительные линейные и угловая деформация;
- $\sigma_r$, $\sigma_z$, $\tau_{rz}$ — нормальные и касательные напряжения в плоскости сечения;
- $\sigma_\theta$ — нормальное напряжение в направлении ортогональном плоскости сечения;
- E, $E_i$ — модули Юнга по главным направлениям упругости;
- G — модуль сдвига;

- $\nu,\nu_{ik}$ — коэффициенты Пуассона, характеризующие поперечное сокращение при сжатии или расширение при растяжении в направлении осей координат. Первый индекс показывает направление деформации, второй — направление действия силы.

Относительные линейные и угловая деформации $\varepsilon_r,\varepsilon_z,\varepsilon_\theta,\gamma_{rz}$ через смещения запишутся следующим образом:

$$\varepsilon_z = \frac{\partial v}{\partial z},\ \varepsilon_r = \frac{\partial u}{\partial r},\ \varepsilon_\theta = \frac{u}{r},\ \gamma_{rz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial r}.$$

Деформации и напряжения связаны между собой зависимостями:

***изотропное тело:***

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E}\left[\sigma_z - \nu\left(\sigma_r + \sigma_\theta\right)\right],$$

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E}\left[\sigma_r - \nu\left(\sigma_z + \sigma_\theta\right)\right],$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{E}\left[\sigma_\theta - \nu\left(\sigma_z + \sigma_r\right)\right],$$

$$\gamma_{rz} = \tau_{rz} / G,$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)};$$

***трансверсально-изотропное тело:***

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E}\sigma_r - \frac{\nu}{E}\sigma_\theta - \frac{\nu'}{E_z}\sigma_z,$$

$$\varepsilon_\theta = -\frac{\nu}{E}\sigma_r + \frac{1}{E}\sigma_\theta - \frac{\nu'}{E_z}\sigma_z,$$

$$\varepsilon_z = -\frac{\nu''}{E}\left(\sigma_r + \sigma_\theta\right) + \frac{1}{E_z}\sigma_z,$$

$$\gamma_{rz} = \tau_{rz} / G_r,$$

$$\nu' = \nu_{rz} = \nu_{\theta z},\ \nu'' = \nu_{zr} = \nu_{z\theta};$$

***ортотропное тело:***

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E_z}\sigma_z - \frac{\nu_{zr}}{E_r}\sigma_r - \frac{\nu_{z\theta}}{E_\theta}\sigma_\theta,$$

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E_r}\sigma_r - \frac{\nu_{r\theta}}{E_\theta}\sigma_\theta - \frac{\nu_{rz}}{E_z}\sigma_z,$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{E_\theta}\sigma_\theta - \frac{\nu_{\theta r}}{E_r}\sigma_r - \frac{\nu_{\theta z}}{E_z}\sigma_z.$$

$$\gamma_{rz} = \tau_{rz} / G$$

Предполагается, что выполнены условия симметрии: $E_r\nu_{r\theta} = E_\theta\nu_{\theta r}$, $E_z\nu_{zr} = E_r\nu_{rz}$, $E_\theta\nu_{\theta z} = E_z\nu_{z\theta}$, являющиеся обязательными для любого анизотропного материала, для которого справедливо допущение о существовании упругого потенциала.

## Набор конечных элементов

При построении элементов использовались аппроксимирующие функции, как и для решения плоской задачи теории упругости.

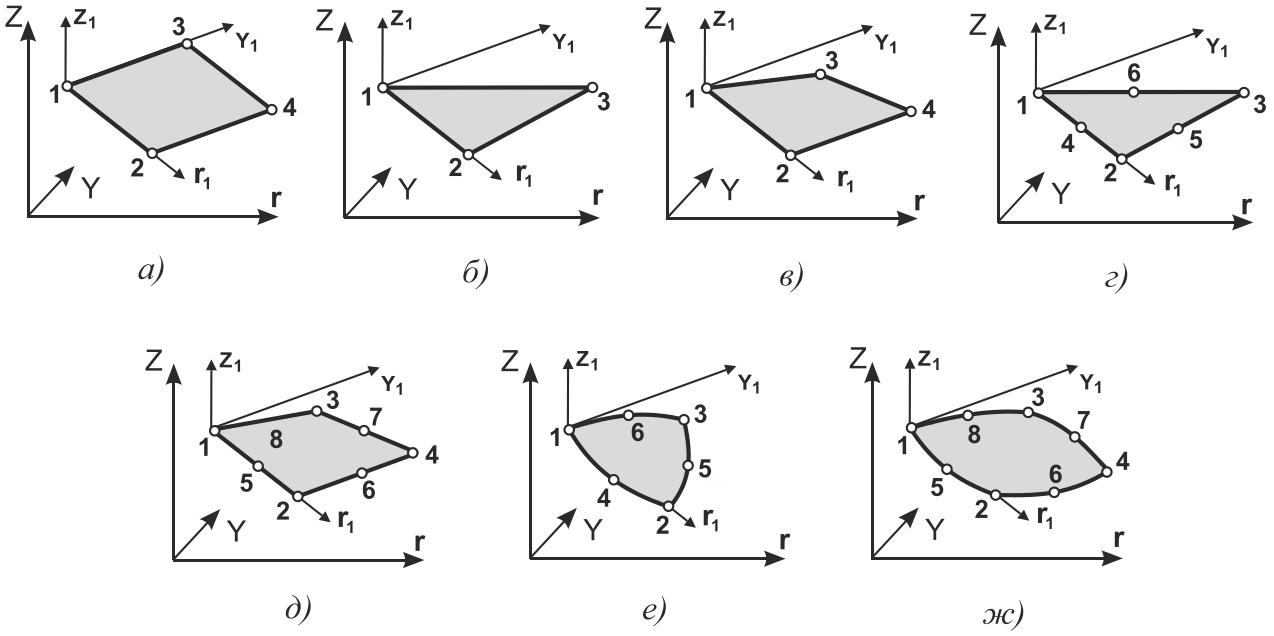



Рис. 3.6-2. *Осесимметричные конечные элементы*

Существуют следующие группы типов элементов, которые могут быть расположены только в плоскости rOz:

- имеющие по две степени свободы в узле — R и W, являющиеся тангенциальными перемещениями, соответственно, по осям R и Z. КЭ могут использоваться в схемах с признаками 11 и 12;
- имеющие по три степени свободы в узле — R и W, и U — угол поворота вокруг нормали к плоскости ROZ [1]. КЭ должны использоваться только в схемах с признаком 12.

Для решения осесимметричной задачи теории упругости реализованы конечные элементы, приведенные в табл. 3.6.1.

**Таблица 3.6-1.** Типы элементов для осесимметричной задачи теории упругости

| Степени свободы узлов | Тип | Наименование | Число узлов | Порядок нумерации узлов и местные оси | Коментарии |
|---|---|---|---|---|---|
| R, W | 61 | Прямоугольный | 4 | рис. 3.6-2, *а* | полилинейные функции формы |
| | 62 | Треугольный | 3 | рис. 3.6-2, *б* | линейные функции формы |
| | 64 | Четырехугольный | 4 | рис. 3.6-2, *в* | *SubAreas* [26, 23] |
| | 66 | Четырехугольный | 4-8 | рис. 3.6-2, *ж* | изопараметрический |
| | 65 | Треугольный | 3-6 | рис. 3.6-2, *г* | *SubAreas* [26, 23] |
| | 68 | Треугольный | 3-6 | рис. 3.6-2, *е* | изопараметрический |
| | 70 | Четырехугольный | 4-8 | рис. 3.6-2, *д* | *SubAreas* [26, 23] |
| Элементы с вращательными (*DDF*) и квазивращательными степенями свободы (*QRDF*) | | | | | |
| R, W, U | 162 | Треугольный | 3 | рис. 3.6-2, *б* | *DDF* [88, 23] |
| | 164 | Четырехугольный | 4 | рис. 3.6-2, *в* | *DDF, SubAreas* [88, 23] |
| | 165 | Треугольный | 3-6 | рис. 3.6-2, *г* | *DDF, SubAreas* [88, 23] |
| | 170 | Четырехугольный | 4-8 | рис. 3.6-2, *д* | *DDF, SubAreas* [88, 23] |
| | 562 | Треугольный | 3 | рис. 3.6-2, *б* | *QRDF* [88, 23] |
| | 564 | Четырехугольный | 4 | рис. 3.6-2, *д* | *QRDF, SubAreas* [88, 23] |
| | 566 | Четырехугольный | 4 | рис. 3.6-2, *д* | *QRDF* [88, 23] |

[1] Это может быть как усредненный угол поворота, так и квазивращательная степень свободы [88].

У всех осесимметричных элементов местная система координат совпадает с общей, и по умолчанию усилия будут вычислены в общей системе координат. Вычисляются напряжения: $N_X$ ($N_r$), $N_Y$ ($N_\theta$), $N_Z$, $T_{XZ}$ ($T_{rZ}$) (см. разд. 13.6).

## Особенности задания исходной информации для осесимметричных конечных элементов

Все элементы этого типа должны лежать в плоскости симметрии rOz, а ось нормали к этой плоскости $Y_1$ всегда совпадает с осью Y. Поскольку для осесимметричных КЭ решается пространственная задача теории упругости в осесимметричной постановке, то задание жесткостных характеристик аналогично объемным конечным элементам при тех ограничениях симметрии, которые накладывает решаемая задача.

Одновременно с данными элементами допускается включать в расчетную схему только специальные конечные элементы, описанные в разделе 3.8.

При задании узловых сил необходимо умножить значение силы, действующей на единицу длины дуги окружности, на длину этой окружности.

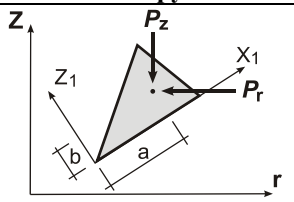
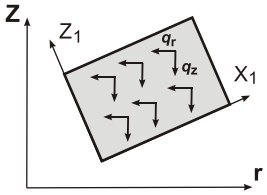
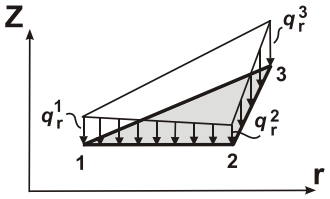
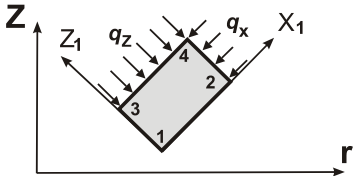
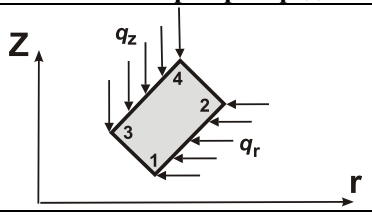
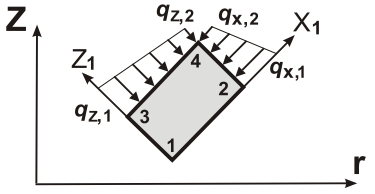
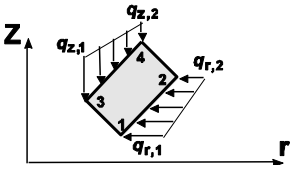
## Местные нагрузки

На конечном элементе для решения осесимметричной задачи теории упругости определяется вспомогательная местная система координат для задания нагрузки. Ее построение аналогично построению местной системы координат $X_1OZ_1$ для элементов плоской задачи теории упругости (см. разд. 3.4). Ось $X_1$ проходит от первого узла ко второму, а ось $Z_1$ лежит в плоскости rOz и направлена в сторону третьего узла. В местной системе координат допускается задание только равномерно распределенной и трапециевидной нагрузок по линии. Местная нагрузка на осесимметричные конечные элементы может задаваться как в местной, так и в общей системе координат.

Допускают следующие местные нагрузки:

- сосредоточенные нагрузки, которые задаются в виде значений сил, действующих в заданном направлении и приложенных к точке элемента;
- равномерно распределенные нагрузки, которые действуют в заданном направлении и задаются в виде интенсивности силы (величиной силы, приходящейся на единицу объема). Нагрузка действует по всему объему, полученному вращением элемента вокруг оси симметрии Z;
- трапециевидные нагрузки, которые действуют в заданном направлении и задаются в виде значений интенсивности силы, определенных во всех вершинах элемента. Нагрузка действует по всему объему, полученному вращением элемента вокруг оси симметрии Z. Порядок задания значений интенсивности нагрузки должен соответствовать порядку нумерации узлов элемента, приведенному при его описании в данном разделе;
- равномерно распределенные «по линии» нагрузки, которые действуют в заданном направлении. Они действуют фактически на поверхности, полученной вращением вокруг оси Z отрезка, соединяющего два узла элемента. Начало и конец отрезка задаются порядковыми номерами узлов, приведенными при описании элемента в данном разделе, и интенсивностью силы (величиной силы, приходящейся на единицу площади);
- трапециевидные «по линии» нагрузки, которые действуют в заданном направлении на отрезке, соединяющем два узла элемента. Т. е. фактически на поверхности, полученной вращением вокруг оси Z отрезка, начало и конец которого задаются порядковыми номерами узлов (номера узлов приведены при описании элемента в данном разделе). Задается интенсивность силы, приходящейся на единицу площади, в начале и конце отрезка;
- температурное воздействие в виде общего нагрева/охлаждения по отношению к температуре замыкания.

**Таблица 3.6-2**

| Схема нагрузки | Направление | Величины |
|---|---|---|
| **Сосредоточенная нагрузка в общей системе координат** с привязками в местной системе координат | | |
|  | по радиусу<br>вдоль оси Z | $P_r$, $a$, $b$<br>$P_z$, $a$, $b$ |
| **Равномерно распределенная нагрузка** в общей системе координат | | |
|  | по радиусу<br>вдоль оси Z | $q_r$<br>$q_z$ |
| **Трапециевидная нагрузка** в общей системе координат | | |
|  | по радиусу<br>вдоль оси Z | $q_r^1, q_r^2, \dots, q_r^n$<br>$q_z^1, q_z^2, \dots, q_z^n$ |
| **Равномерно распределенная нагрузка по линии** в местной системе координат | | |
|  | вдоль оси $X_1$<br>вдоль оси $Z_1$ | $n_1$ $n_2$ $q_x$<br>$n_1$ $n_2$ $q_z$ |
| **Равномерно распределенная нагрузка по линии** в общей системе координат | | |
|  | по радиусу<br>вдоль оси Z | $n_1$ $n_2$ $q_r$<br>$n_1$ $n_2$ $q_z$ |
| **Трапециевидная нагрузка по линии** в местной системе координат | | |
|  | вдоль оси $X_1$<br>вдоль оси $Z_1$ | $n_1$, $n_2$, $q_{x,1}$, $q_{x,2}$<br>$n_1$, $n_2$, $q_{z,1}$, $q_{z,2}$ |
| **Трапециевидная нагрузка по линии** в общей системе координат | | |
|  | по радиусу<br>вдоль оси Z | $n_1$, $n_2$, $q_{r,1}$, $q_{r,2}$<br>$n_1$, $n_2$, $q_{z,1}$, $q_{z,2}$ |

**Температурная нагрузка на осесимметричные элементы** **Таблица 3.6-3**

| Воздействие | Величины | Примечания |
|---|---|---|
| Общий нагрев (охлаждение) по отношению к температуре замыкания. | $\Delta t$, [$\alpha$] | $\Delta t$ — увеличение (уменьшение) температуры среднего слоя пластины по отношению к нормальным условиям эксплуатации (температуре замыкания);<br>$\alpha$ — коэффициент линейного расширения материала;<br>$\alpha_R$, $\alpha_Z$ — коэффициенты линейного расширения, соответственно, по осям r или Z общей системы координат. Позволяют учесть ортотропию материала. |
| | $\Delta t$, [$\alpha_R$] | |
| | $\Delta t$, [$\alpha_Z$] | |
| | $\Delta t$, [$\alpha_R$, $\alpha_Z$] | |
| ***Замечание:*** При расчете используются коэффициенты температурного расширения, заданные в жесткостных характеристиках соответствующего элемента. При конвертации файлов предыдущих версий используется коэффициент температурного расширения, заданный при описании нагрузки. При этом выдается соответствующее предупреждение. Задание коэффициентов температурного расширения для конкретной нагрузки возможно лишь при подготовке данных в текстовом формате. | | |

## 3.7. Конечные элементы для расчета кусочно-неоднородных по толщине (многослойных) пластин и пологих оболочек

### Назначение конечных элементов

Предназначены для прочностного расчета тонких и средней толщины однослойных и многослойных пологих ортотропных (изотропных, трансверсально-изотропных) оболочек и пластин слоистой структуры по толщине (рис. 3.7-1) с резко отличающимися упругими характеристиками слоев, для которых применение гипотез прямых нормалей Кирхгофа-Лява становится неправомерным, так как может привести к искажению результатов [7, 50]. При этом учитывается влияние на напряженно-деформированное состояние конструкции деформаций поперечного сдвига, обжатия слоев и кривизны, а также межслоевых сдвигов и кривизны.

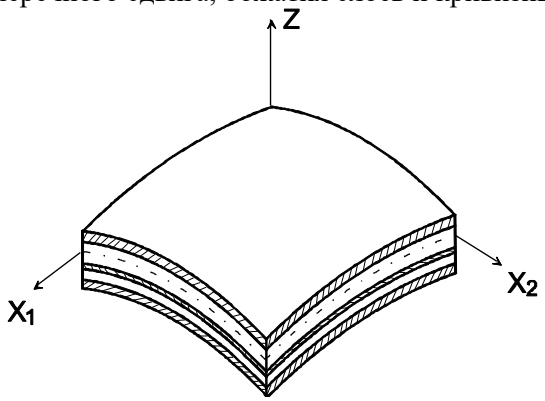



Рис. 3.7-1

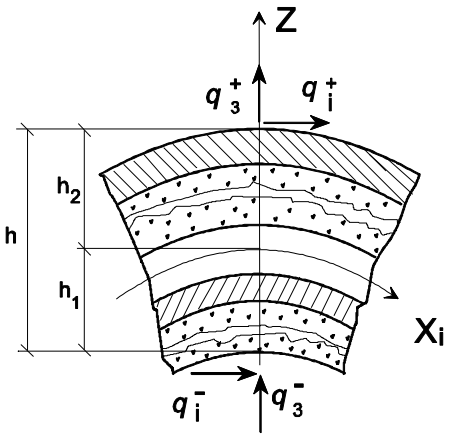



Рис. 3.7-2

При построении расчетных зависимостей используются модели, учитывающие изменение перемещений по толщине пакета слоев, отличное от линейного распределения. Приведем исходные гипотезы и соотношения прикладной теории многослойных ортотропных пологих оболочек и пластин [7, 50], положенной в основу построения конечных элементов.

Рассматривается многослойная оболочка постоянной толщины (h=const), отнесенная к ортогональной системе криволинейных координат $X_1$, $X_2$, Z (рис. 3.7-2), у которой координатные линии $X_1$, $X_2$ совпадают с линиями главных кривизн поверхности приведения (Z=0), а ось Z направлена по нормали к этой поверхности. Количество слоев и порядок их следования произвольны.

В самом общем случае материал слоев может быть ортотропным, но его физико-механические характеристики в пределах k-го слоя предполагаются постоянными (k=1, 2,...,n), хотя могут меняться от слоя к слою по толщине пакета.

Поверхности раздела слоев совпадают с эквидистантными поверхностями $Z = Z_k$ (k =2, 3,..., n), где $Z = Z_1 = -h_1$ является нижней граничной поверхностью, а $Z = Z_{n+1} = h_2$ — верхней граничной поверхностью (рис. 3.7-2). Оболочка находится под действием произвольно ориентированной нагрузки $q^-_j(x_i)$ и $q^+_j(x_i)$ (i=1, 2; j=1, 2, 3), приложенной к верхней и нижней поверхностям, а также объемных сил $F_j$ ($X_i$, Z), действующих по направлению осей координат.

Предполагается, что в пределах одного конечного элемента величины, характеризующие геометрическую форму поверхности оболочки (коэффициенты первой квадратичной формы $A_i$ и главные кривизны $K_{ik}$; i, k = 1, 2) постоянны. Возникающая при этом погрешность пропорциональна размеру конечного элемента.

При построении элементов использовались аппроксимирующие функции как для однослойных оболочечных элементов.

## Исходные соотношения модели, учитывающей поперечный сдвиг, обжатие слоев и кривизну

В основу физической модели положены гипотезы, определяющие закон изменения по толщине многослойной оболочки поперечных касательных $\sigma_{j3}$ и нормального $\sigma_{33}$ напряжений, а также поперечной деформации $e_{33}$:

$$\sigma_{j3} = q_j^+ \frac{h_1 + z}{h} + q_j^- \frac{h_2 - z}{h} + G_{j3}(z) f_j'(z)\psi_j(x_1, x_2),$$

$$\sigma_{33} = q_j^+ \frac{h_1 + z}{h} + q_j^- \frac{h_2 - z}{h} + \varphi(z) p(x_1, x_2),$$

$$e_{33} = f_3''(z)\psi_3(x_1, x_2), \qquad j=1, 2,$$

где $G_{j3}$ — кусочно-непрерывные функции, характеризующие соответствующий модуль сдвига слоев;

$\psi_s(x_1, x_2)$ — искомые функции, позволяющие учесть поперечный сдвиг (s=1, 2) и обжатие (s=3). Они дополняют классические функции перемещений $v_j(x_1, x_2)$ (j=1,2) и $w(x_1, x_2)$;

$f_s(z)$, $\varphi(z)$ — задаваемые вспомогательные функции, описывающие нелинейный закон изменения напряжений и деформаций в зависимости от жесткостных характеристик. Форма их записи позволяет выбирать положение поверхности приведения произвольно в пределах толщины пакета слоев, удовлетворяет условиям неразрывности между слоями и граничным условиям на наружных поверхностях оболочки;

$p(x_1, x_2)$ — функция, характеризующая поперечное обжатие и определяемая через искомые функции $v_j$, w и $\psi_s$.

Вспомогательные функции $f_s(z)$, (s =1, 2, 3) выбираются исходя из закона распределения по толщине оболочки величин $\sigma_{j3}$ (j = 1, 2) и $\sigma_{33}$, полученного на основании классических гипотез, а функция распределения поперечных нормальных напряжений по толщине слоистой оболочки $\varphi(z)$ назначается из условия непрерывности и равенства нулю на наружных поверхностях оболочки $\varphi(-h_1) = \varphi(h_2) = 0$. Порядок определения и вид этих функций приведен в [7].

Геометрическая модель деформированного состояния упругой слоистой оболочки, полученная из соотношений Коши и принятых гипотез и позволяющая выразить значения перемещений в любой точке через значения искомых функций $v_i(x_1, x_2)$, $w(x_1, x_2)$ и $\psi_s(x_1, x_2)$, имеет вид:

$$u_j(x_1, x_2, z) = v_j(x_1, x_2) - \frac{1}{A_j} z \frac{\partial w}{\partial x_j} + f_j(z)\psi_j(x_1, x_2) - f_3(z)\frac{1}{A_j}\frac{\partial \psi_3}{\partial x_j} + u_j^{(0)}$$

$$u_3(x_1, x_2, z) = w(x_1, x_2) + f_3'(z)\psi_3(x_1, x_2), \qquad j=1, 2,$$

где $u_j^{(0)}$ — дополнительные слагаемые, отвечающие нагружению наружных поверхностей оболочки тангенциальными нагрузками.

Такая модель позволяет наряду с перемещениями, определяемыми на основании классической теории оболочек, дополнительно учесть перемещения, обусловленные явлениями поперечного сдвига и нормального обжатия.

Составляющие деформации в плоскости приведения $e_{11}$, $e_{22}$, $e_{12}$ находятся при обычных для пологих оболочек упрощениях по формулам Коши через перемещения, а компоненты поперечной деформации сдвига определяются соотношением:

$$e_{j3} = \frac{1}{2}\left[f_j'(z)\psi_j(x_1, x_2) + u_{j,3}^{(0)}\right], \qquad j = 1, 2.$$

Тензор напряжений $\sigma_{ij}$ (i, j = 1, 2, 3) определяется, исходя из обобщенного закона Гука для ортотропного упругого тела.

Обобщенные перемещения, составляющие вектор обобщенных перемещений, можно условно разбить на две группы перемещений, имеющих одинаковый математический смысл:

*а*) $v_i$ и $\psi_i$ (i=1,2) — «мембранная» группа обобщенных перемещений, входящая в функционал потенциальной энергии с производными не выше первого порядка;

*б*) w и $\psi_3$ — «изгибная» группа обобщенных перемещений, входящая в функционал потенциальной энергии с производными не выше второго порядка.

**Таблица 3.7-1**

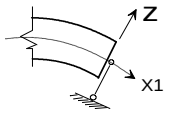
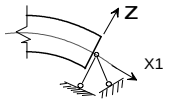
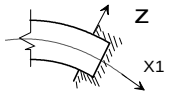
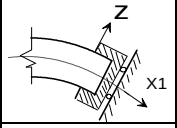
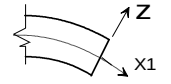
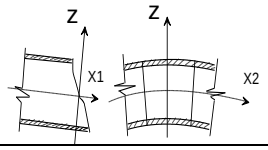
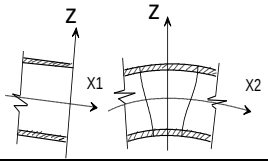
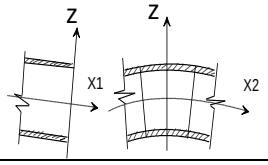
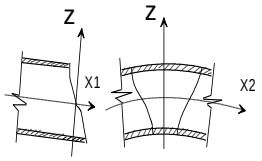
| **Граничные условия, определяющие закрепление контура оболочки в целом для края ($X_1$, $X_2$=const)** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Внешние связи (Z=0) | Эскиз | Геометрические (кинематические) условия | | | |
| | | $u_n$ | $u_r$ | w | $\frac{\partial w}{\partial n}$ |
| Шарнирно-подвижное опирание |  | | * | * | |
| Шарнирно-неподвижное опирание |  | * | * | * | |
| Жесткое защемление |  | * | * | * | * |
| Подвижная заделка |  | * | * | | * |
| Свободный край |  | | | | |

**Таблица 3.7-2**

| **Граничные условия, препятствующие деформациям поперечного сдвига и обжатия на контуре оболочки для края ($X_1$, $X_2$=const)** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Торцевые диафрагмы (Z = 0) | Эскиз | Геометрические (кинематические) условия | | | |
| | | $\psi_n$ | $\psi_\tau$ | $\frac{d\psi_3}{dn}$ | $\frac{d\psi_3}{d\tau}$ |
| Гибкая из плоскости торца |  | | * | * | |
| Гибкая в плоскости торца |  | * | | | * |
| Жесткая неискривляемая |  | * | * | * | * |
| Диафрагма отсутствует |  | | | | |

В таблице 3.7-1 приведены различные варианты внешних и торцевых связей. Первые определяют закрепление контура в целом (опирание, заделку и т. д.), а вторые — препятствуют деформациям поперечного сдвига и обжатия на контуре. Знаком «*» отмечены степени свободы, по направлению которых перемещения или углы поворота равны нулю. Контур оболочки (пластины) или его часть с определенным видом торцевых диафрагм может иметь любые внешние связи (см. табл. 3.7-2). В таблицах использованы следующие обозначения:

$u_n$, $u_\tau$ — перемещения по нормали и по касательной к контуру, лежащие на поверхности оболочки;

$\psi_n$, $\psi_\tau$ — проекция обобщенных перемещений $\Psi_1$, $\Psi_2$ на n и τ;

$\frac{\partial w}{\partial n}$, $\frac{\partial \psi_3}{\partial n}$, $\frac{\partial \psi_3}{\partial \tau}$ — производные по нормали и касательной к контуру.

Таким образом, комбинируя представленные в таблицах группы связей, можно рассчитывать оболочки и пластины с различными конструктивными особенностями на контуре, то есть краевые условия дают возможность учесть различного типа диафрагмы жесткости на торцах конструкции, что значительно расширяет класс решаемых задач.

## Исходные соотношения модели, учитывающей межслоевые сдвиги и кривизну

Если не учитывается обжатие слоев, то в основу построения физической модели может быть положена гипотеза, определяющая закон изменения по толщине многослойной оболочки поперечных касательных напряжений $\sigma_{j3}(x_i, z)$, а также допущения об отсутствии поперечных нормальных напряжений и деформаций:

$$\sigma_{j3} = G_{j3}(z)\sum_{p=1}^{2} f_{pj}(z)\psi_{pj}(x_1, x_2),$$

$$\sigma_{33}, e_{33} = 0; \qquad j = 1,2;$$

где $\psi_{pj}(x_1, x_2)$ — искомые функции сдвига первого и второго приближений (при p = 1 — дополняют классические функции перемещений $v_j(x_1, x_2)$ в первом приближении и уточняют гипотезу на втором этапе построения модели, а при p = 2 — учитывают вклад в касательные напряжения от тангенциальных нагрузок);

$f_{pj}(z)$ — заданные функции распределения поперечных сдвигов по толщине пакета слоев, выбираемые таким образом, чтобы удовлетворялись условия равенства поперечных касательных напряжений на поверхностях контакта слоев и граничные условия на наружных поверхностях оболочки (при p = 2 — учитывают влияние свойств материала слоев на касательные напряжения от воздействия тангенциальных нагрузок);

s — номер соответствующего приближения сдвиговой модели.

Кинематическая модель деформированного состояния упругой слоистой оболочки, полученная из соотношений Коши и принятых гипотез и позволяющая выразить значения перемещений в любой точке через значения искомых функций $v_j(x_1, x_2)$, $w_j(x_1, x_2)$, $\psi^{(s)}_{pj}(x_1, x_2)$, имеет вид:

$$u_j(x_1, x_2, z) = v_i(x_1, x_2) - \frac{1}{A_j} z \frac{\partial w}{\partial x_j} - \sum_{p=1}^{2} f_{pj}(z)\psi_{pj}(x_1, x_2).$$

Такая модель наряду с перемещениями, определяемыми на основании классической модели, дополнительно учитывает перемещения, обусловленные явлениями поперечного сдвига, а также тангенциальные нагрузки на наружных поверхностях оболочки — при p = 2.

Составляющие деформации в плоскости приведения $e_{ij}$ находятся при обычных для пологих оболочек упрощениях по формулам Коши через перемещения. Компоненты поперечной деформации сдвига определяются соотношениями:

$$e_{j3} = \frac{1}{2} f'_{pj}(z)\psi_{pj}(x_1, x_2), \qquad j = 1, 2.$$

Тензор напряжений $\sigma_{ij}$ (i, j=1, 2, 3) определяется исходя из обобщенного закона Гука для ортотропного упругого тела.

Обобщенные перемещения, составляющие вектор обобщенных перемещений, можно условно разбить на две группы, имеющие одинаковый математический смысл:

а) $v_i$ и $\psi_{pi}$ — «мембранная» группа обобщенных перемещений, входящая в функционал потенциальной энергии с производными не выше первого порядка (i, p=1, 2);

б) w — «изгибная» группа обобщенных перемещений, входящая в функционал потенциальной энергии с производными не выше второго порядка.

Различные варианты внешних и торцевых связей (первые определяют закрепление контура в целом, а вторые — препятствуют деформациям поперечного сдвига на контуре) определяются данными таблиц 3.7-1 и 3.7-2. Знаком «*» отмечены степени свободы, по направлению которых перемещения или углы поворота равны нулю. Контур оболочки (пластины) или его часть с определенным видом торцевых диафрагм может иметь любые внешние связи (см. табл. 3.7-2), где n и $\tau$ — нормаль и касательная к контуру, лежащие на поверхности оболочки, $\Psi_n$, $\Psi_\tau$ — проекции функций $\Psi_1$ и $\Psi_2$ на n и $\tau$.

Комбинируя представленные в таблицах 3.7-1 и 3.7-2 группы связей, можно рассчитывать оболочки и пластины с различными конструктивными особенностями на контуре, то есть краевые условия дают возможность учесть различного типа диафрагмы жесткости на торцах конструкции, что значительно расширяет класс решаемых задач.

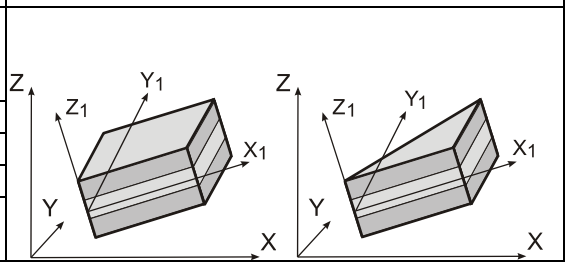
Заметим, что учет влияния обжатия слоев или межслоевых сдвигов в рассматриваемых КЭ позволяет рассчитывать даже однослойные конструкции, представляющие собой плиты и оболочки средней толщины.

## Многослойные элементы в составе библиотеки КЭ

В таблице 3.7-3 перечислены многослойные элементы, включенные в систему **SCAD**.

Узлы находятся на срединной поверхности. Все элементы имеют местную систему координат $X_1OY_1$, в которой ось $X_1$ проходит от первого узла ко второму, а ось $Y_1$ лежит в плоскости элемента ортогонально $X_1$ и направлена в сторону третьего узла.

**Таблица 3.7-3**

| Форма | Тип элемента | | Местные оси |
|---|---|---|---|
| | Учет поперечного сдвига, обжатия слоев и кривизны | Учет межслоевых сдвигов и кривизны |  |
| Прямоугольный | 71 | 81 | |
| Треугольный | 72 | 82 | |
| Четырехугольный | 73 | 83 | |
| Четырехугольный с числом узлов от 4 до 8 | 74 | 84 | |



Материал слоев может быть изотропным, трансверсально-изотропным и ортотропным. Возможен учет модели упругого основания Винклера с одним коэффициентом постели $C_1$.

Многослойные элементы типов 71–74, учитывающие поперечный сдвиг, обжатие слоев и кривизны, имеют по двенадцать степеней свободы в узле, интерпретация которых приведена в таблице 3.7-4.

**Таблица 3.7-4**

| Наименование | Типы степеней свободы | Содержание |
|---|---|---|
| U, V, W | 1, 2, 3 | линейные перемещения по осям X, Y, Z |
| $U_X = -\frac{\partial w}{\partial x}, U_Y = \frac{\partial w}{\partial y}, U_Z$ | 4, 5, 6 | углы поворота относительно осей X, Y, Z |
| $A_X=\Psi_1, A_Y=\Psi_2, A_Z=\Psi_3$ | 7, 8, 9 | аналоги линейных перемещений по осям X, Y, Z, моделирующие обжатие слоев в соответствующем направлении |
| $B_X = -\frac{\partial \psi_3}{\partial x}, B_Y = \frac{\partial \psi_3}{\partial y}, B_Z$ | 10, 11, 12 | аналоги углов поворота относительно осей X, Y, Z, моделирующие влияние деформаций нормального обжатия |

Первые шесть степеней свободы узла являются основными и отвечают мембранным и изгибным деформациям, вторые шесть — деформациям поперечного сдвига и обжатия.

Угол поворота $U_Z$ и его аналог $B_Z$ в местной системе координат элемента равны нулю. Они появляются при стыковке не лежащих в одной плоскости элементов и необходимы для учета пространственной работы конструкций.

Рассматриваемые элементы могут использоваться только с признаком схемы 8.

Многослойные элементы типов 81-84, учитывающие межслоевые сдвиги и кривизны, имеют по двенадцать степеней свободы в узле, интерпретация которых приведена в таблице 3.7-5.

**Таблица 3.7-5**

| Наименование | Типы степеней свободы | Содержание |
|---|---|---|
| U, V, W | 1, 2, 3 | линейные перемещения по осям X, Y, Z |
| $U_X = -\frac{\partial w}{\partial x}, U_Y = \frac{\partial w}{\partial y}, U_Z$ | 4, 5, 6 | углы поворота относительно осей X, Y, Z |
| $A_X = \Psi_{11}, A_Y = \Psi_{12}, A_Z$ | 7, 8, 9 | аналоги линейных перемещений по осям X, Y, Z, моделирующие сдвиг в направлении соответствующей оси в модели первого приближения |

| Наименование | Типы степеней свободы | Содержание |
|---|---|---|
| $C_X = \Psi_{21}$, $C_Y = \Psi_{22}$, $C_Z$ | 13, 14, 15 | аналоги линейных перемещений по осям X, Y, Z, моделирующие сдвиг в направлении соответствующей оси в модели второго приближения |

Первые шесть степеней свободы являются основными и отвечают мембранным и изгибным деформациям, а их аналоги — деформациям поперечного сдвига.

Угол поворота $U_Z$ и аналоги линейного перемещения $A_Z$ и $C_Z$ в местной системе координат элемента равны нулю. Они появляются при стыковке не лежащих в одной плоскости элементов и необходимы для учета пространственной работы конструкций.

Рассматриваемые элементы могут использоваться только с признаком схемы 9.

Усилия для всех многослойных элементов вычисляются в местной системе координат элемента. В каждой точке рассматривается весь пакет слоев и на верхней и нижней границах каждого слоя будут вычислены $N_X$, $N_Y$, $N_Z$, $T_{XY}$, $T_{XZ}$, $T_{YZ}$ (см. разд. 13.6). Дополнительно могут быть вычислены горизонтальные перемещения ($U_G$, $V_G$) и прогиб ($W_G$). Для определения напряжений на срединной поверхности оболочки необходимо, чтобы эта поверхность была границей между двумя слоями. Это всегда можно сделать, разделив центральный слой на дополнительные слои с одинаковыми физико-механическими характеристиками.

В графическом постпроцесоре вычисляются суммарные моменты $M_X$, $M_Y$, $M_{XY}$, перерезывающие силы $Q_X$, $Q_Y$ и усилия $SN_X$, $SN_Y$, $ST_{XY}$ в сечении пластины.

### Особенности задания исходной информации для многослойных конечных элементов

При описании каждого k-го слоя пакета в зависимости от свойств его материала задаются следующие данные:

$E^{(k)}$(Т/м$^2$), $\nu^{(k)}$ — для изотропного материала;

$E^{(k)}$(Т/м$^2$), $\nu_{13}^{(k)}$, $\nu_{31}^{(k)}$, $G_{13}^{(k)}$(Т/м$^2$) — для трансверсально-изотропного материала;

$E_1^{(k)}$(Т/м$^2$), $E_2^{(k)}$(Т/м$^2$), $E_3^{(k)}$(Т/м$^2$), $\nu_{12}^{(k)}$, $\nu_{21}^{(k)}$, $\nu_{13}^{(k)}$, $\nu_{31}^{(k)}$, $\nu_{23}^{(k)}$, $\nu_{32}^{(k)}$, $G_{12}^{(k)}$(Т/м$^2$), $G_{13}^{(k)}$(Т/м$^2$), $G_{23}^{(k)}$(Т/м$^2$) — для ортотропного материала.

Всегда указывается толщина слоя $\delta^{(k)}$.

При наличии упругого основания задается коэффициент постели $C_1$(Т/м$^3$).

Если элементы являются однородными по толщине, то в этом случае жесткостные характеристики можно задавать как жесткости обычных пластин и оболочек, описанных в разделе 0. При этом надо задавать только те характеристики, которые реализованы в многослойных элементах, где, например, отсутствует учет коэффициента $C_2$(Т/м) модели упругого основания Пастернака.

Для всех конечных элементов напряжения (усилия) вычисляются как в центре элементов, так и в их узлах. Управление их выводом описано в главах 8 и 13.

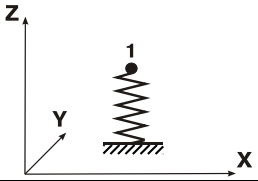
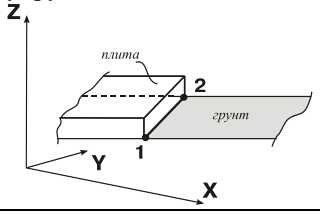
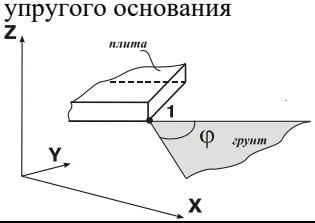
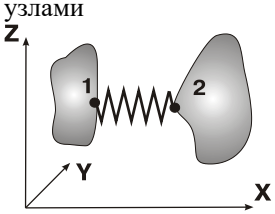
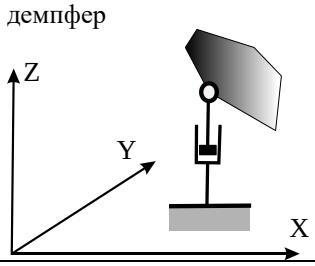
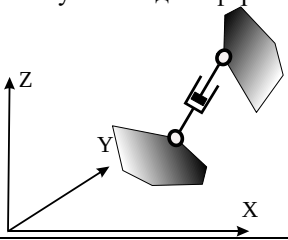
### Местные нагрузки

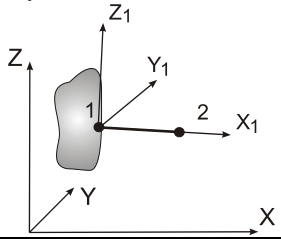
На многослойные КЭ аналогично элементам тонкой оболочки допускается задание всех видов нагрузок (кроме температурных) как в местной, так и в общей системах координат с привязками в местной и в общей системах координат (см. разд. 3.4).

## 3.8. Специальные конечные элементы

Эти элементы предназначены для ограничения линейных и угловых перемещений по направлениям осей местной системы координат (в общем случае не совпадающей с общей системой координат), введения связей конечной жесткости по направлению осей общей системы координат, учета податливости материала между смежными узлами (податливость раствора или металлических прокладок между элементами) и т. п. Список таких элементов содержится в табл. 3.8-1, их описание приведено ниже.

**Таблица 3.8-1**

| Тип КЭ | Наименование КЭ | Признак схемы | Положение в пространстве | Степени свободы | Комментарии |
|---|---|---|---|---|---|
| 51 | Связь конечной жесткости   | любой | произвольно | любая | Применяется для учета податливости опорной связи |
| 53 | Законтурный двухузловой конечный элемент упругого основания   | 3, 5, 8, 9 | в горизонтальной плоскости | Z | Учитывает влияние полосы грунта за пределами конструкции |
| 54 | Законтурный одноузловой конечный элемент упругого основания   | 3, 5, 8, 9 | произвольно | Z | Учитывает сдвиговое влияние угловой зоны грунта за пределами конструкции |
| 55 | Упругая связь между узлами   | любой | произвольно | любые | Учет податливости стыков конструкции |
| 56 | Внешний узловой демпфер   | любой | произвольно | X, Y, Z | Применяется для описания внешних демпфирующих устройств реагирующих на скорость перемещения узла по направлениям степеней свободы в общей системе координат. |
| 57 | Межузловой демпфер   | любой | произвольно | X, Y, Z | Применяется для учета демпфирования возникающего при ненулевой скорости взаимного движения смежных узлов. |

| Тип КЭ | Наименование КЭ | Признак схемы | Положение в пространстве | Степени свободы | Комментарии |
|---|---|---|---|---|---|
| 154 | Нуль-элемент   | любой | произвольно | любые | Применяется для расчета на заданные перемещения, а также для наложения связей, непараллельных глобальной системе координат |
| 200 | Псевдоэлемент | любой | произвольно | | Применяется для удаления элементов из расчетной схемы без нарушения регулярности ее кодирования (используется только в текстовом формате); любая местная нагрузка, заданная на элемент, игнорируется |

## «Нуль-элемент» общего вида (тип КЭ – 154)

Данный КЭ предназначен как для запрещения линейных или угловых перемещений по направлениям осей местной системы координат этого элемента, так и для расчета на заданные перемещения, направления которых не совпадают с направлениями осей общей системы координат.

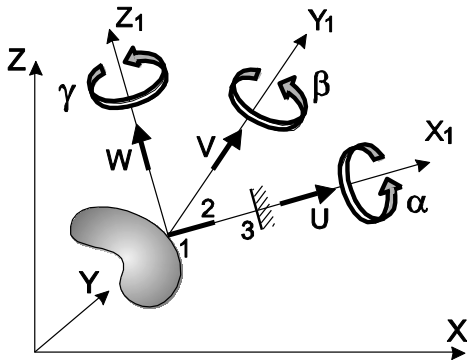



Рис. 3.8-1.

Формально «Нуль-элемент» представляет собой трехузловой конечный элемент [41], состоящий из двух стержней равной длины, которые лежат на одной прямой и жесткости которых по направлению запрещаемой степени свободы (в местной системе координат) задаются конечными величинами разного знака и соизмеримы с жесткостями реальных элементов конструкции (для обеспечения вычислительной устойчивости расчета). Но для пользователя «нуль-элемент» представляется как двухузловой элемент с узлами 1 и 2, из которых узел 1 принадлежит рассчитываемой конструкции, а узел 2 — свободный. Узел 3 используется только при построении матрицы жесткости и в явном виде не указывается.

Необходимо помнить, что формально узел 2 раскреплен только лежащими на одной прямой пружинами с положительной и отрицательной «продольными» жесткостями, поэтому он мог бы иметь перемещения в плоскости ортогональной этой прямой, что привело бы к изменяемой системе. В связи с этим при задании информации об этом элементе система требует, чтобы были заданы не только «продольные», но и поперечные жесткости.

На рис. 3.8-1 представлено схематическое изображение КЭ. Местная система координат образуется аналогично пространственному стержню. Элемент может использоваться при любом признаке схемы.

При описании элемента требуется указать направления, по которым запрещаются перемещения (повороты) и для каждого из них — произвольное положительное число, которое будет интерпретироваться как жесткость элемента. Результат расчета в идеале не должен зависеть от значения этого числа. Но, как уже было написано выше, оно выбирается таким образом, чтобы обеспечить вычислительную устойчивость.

При расчете на заданные перемещения величина перемещения по каждому из направлений задается как местная нагрузка относительно осей местной системы координат в соответствии с используемым признаком схемы. В базовой системе единиц величины линейных перемещений задаются в метрах, угловых — в радианах.

Заданные перемещения можно вводить только в направлениях, по которым указаны ненулевые жесткости (смещение связи). Вычисляемые усилия в «нуль-элементе» представляют собой реакции

в введенных связях или реакции от заданного перемещения первого узла элемента по соответствующим направлениям. Очевидно, что отличны от нуля будут только реакции по направлениям заданных с помощью «нуль-элемента» связей. Усилия вычисляются для сечения, относящегося к началу элемента (первый узел).

## КЭ, моделирующий связи конечной жесткости (тип КЭ – 51)

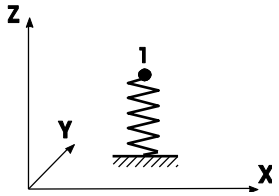



Рис. 3.8-2.

Этот КЭ (рис. 3.8-2) применяется для введения связей конечной жесткости (пружин) по направлениям степеней свободы в общей системе координат и может использоваться, например, для моделирования упругого основания. Связи конечной жесткости задаются только по направлению осей общей системы координат. Введение связи конечной жесткости в узел, имеющий по соответствующему направлению абсолютно жесткую связь, не имеет смысла. Элемент может использоваться при любом признаке схемы.

Число и порядок следования жесткостных характеристик полностью соответствуют используемому признаку схемы. По направлениям, по которым вводятся связи конечной жесткости в узле, задаются ненулевые величины, которые можно интерпретировать следующим образом:

- для перемещений X, Y, Z — это сила, вызывающая единичное смещение узла по заданному направлению. При моделировании упругого «винклеровского» основания в виде упругих узловых опор для задания данной жесткости надо коэффициент постели $C_1$(Т/м$^3$) умножить на площадь поверхности, взаимодействующей с узлом. Задаваемая жесткость в базовой системе единиц имеет размерность Т/м;
- для углов поворота $U_X$, $U_Y$, $U_Z$ — это момент, вызывающий единичные повороты по заданному направлению. Задаваемая жесткость в базовой системе единиц имеет размерность Тм/рад.

В результате расчета вычисляются усилия (реакции в пружинах) по степеням свободы, по направлению которых введены связи конечной жесткости.

## Законтурный двухузловой КЭ упругого основания (тип КЭ – 53)

КЭ применяется для моделирования отпора полосы грунта, перпендикулярного ее контуру, за пределами плиты (за счет работы грунта на сдвиг). При моделировании плит на упругом основании с применением двухпараметрической модели упругого основания (модель Пастернака) применение этих элементов обязательно, поскольку в противном случае возникает противоречие между применяемой моделью, которая учитывает распределительную способность грунта, и не учетом работы основания за пределами плиты.

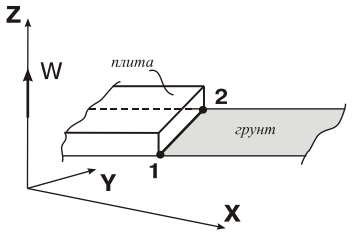



Рис. 3.8-3.

На рис. 3.8-3 представлено схематическое изображение КЭ. Задаются значения коэффициентов постели $C_1$ (Т/м$^3$) и $C_2$ (Т/м). В каждом из узлов КЭ имеется по одной степени свободы w — вертикальное перемещение, определяемое относительно осей общей системы координат.

Результатом расчета являются узловые реакции $R_Z$.

## Законтурный одноузловой КЭ упругого основания (тип КЭ – 54)

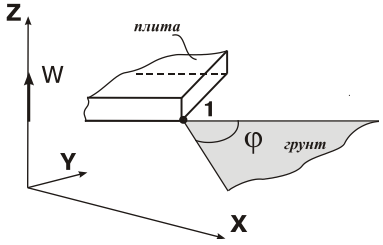



Рис. 3.8-4.

Элемент применяется для моделирования отпора угловой зоны грунта, примыкающего к плите (за счет работы на сдвиг). На рис. 3.8-4 представлено схематическое изображение КЭ. Элемент состоит из одного узла, имеющего одну степень свободы w, — вертикального перемещения, определенного относительно осей общей системы координат. Задается значение коэффициента постели $C_2$(Т/м) и угла φ. В результате расчета вычисляется реакция в узле $R_Z$.

## КЭ, моделирующий упругую связь между узлами (тип КЭ – 55)

Данный КЭ предназначен для учета податливости материала между смежными узлами, например, податливости ростверка или металлических прокладок между элементами. Элемент можно использовать с любым признаком схемы и он позволяет смоделировать как линейную, так и угловую податливость связи по любому направлению. Узлы, между которыми моделируется податливость связи, могут иметь одинаковые координаты.

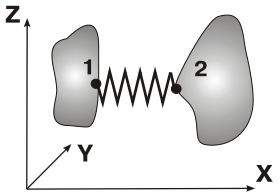



Рис. 3.8-5.

Жесткостные характеристики этих элементов, число и порядок следования которых полностью соответствуют используемому признаку схемы, можно интерпретировать следующим образом:

- для перемещений X, Y, Z — это сила (Т/м, жесткость на сжатие), вызывающая взаимное единичное смещение узлов 1 и 2 по заданному направлению;
- для углов поворота $U_X$, $U_Y$, $U_Z$ — это момент (Тм/рад, жесткость на сдвиг), вызывающий взаимные единичные повороты по заданному направлению.

По умолчанию КЭ моделирует упругую связь между узлами в глобальной системе координат. Возможна работа элемента в местной системе координат. Для этого достаточно задать значение угла поворота конструктивных осей любым из описанных для универсального стержня способом.

Местные нагрузки по области конечного элемента не предусмотрены.

В результате расчета вычисляются усилия (реакции), соответствующие степеням свободы, по направлению которых введены связи конечной жесткости.

## КЭ, моделирующий работу внешнего узлового демпфера (тип КЭ – 56)

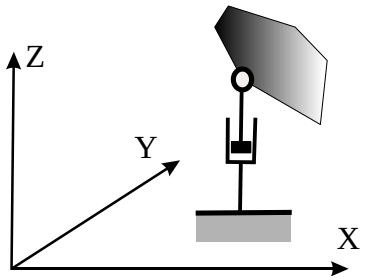



Рис. 3.8-6.

Этот КЭ (рис. 3.8-6) применяется для описания внешних демпфирующих устройств, реагирующих на скорость перемещения узла по направлениям степеней свободы в общей системе координат.

Предполагается, что реализуется вязкое демпфирование, т.е. сила сопротивления движению пропорциональна соответствующей компоненте скорости. Коэффициенты вязкого демпфирования задаются для каждого узлового смещения (поворота) независимо и не влияют друг на друга.

Число и порядок следования жесткостных характеристик полностью соответствуют используемому признаку схемы. Если по направлениям, по которым вводятся демпферы в узле, задаются ненулевые коэффициенты вязкости, то их можно интерпретировать следующим образом:

- для перемещений X, Y, Z — это реактивная сила, возникающая при единичной скорости смещения узла по рассматриваемому направлению. В базовой системе единиц имеет размерность Т/(м/с).

КЭ-56 может использоваться для динамических расчетов только в режиме **Прямое интегрирование уравнений движения.** Другие режимы никак не реагируют на его присутствие в расчетной схеме.

## КЭ, моделирующий работу межузлового демпфера (тип КЭ – 57)

Данный КЭ предназначен для учета демпфирования, возникающего при ненулевой скорости взаимного движения смежных узлов.

Элемент может использоваться при любом признаке схемы. Жесткостные характеристики этих элементов, число и порядок следования которых полностью соответствуют используемому признаку схемы, можно интерпретировать следующим образом:

- для перемещений X, Y, Z — это реактивная сила, возникающая при единичной взаимной скорости смещения (например, сближения или удаление).

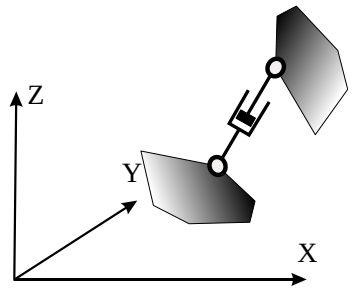



Рис. 3.8-7.

В базовой системе единиц имеет размерность Т/(м/с).

Предполагается что реализуется вязкое демпфирование, т.е. сила сопротивления движению пропорциональна соответствующей компоненте скорости. Коэффициенты вязкого демпфирования задаются для каждого узлового смещения (поворота) независимо и не влияют друг на друга.

Допускается задавать взаимную скорость как в локальной, так и в глобальной системе координат **(пока реализована только работа в глобальной системе координат)**. Локальная система координат x, y, z строится таким же образом, как и для стержня расположенного между парой рассматриваемых узлов (рис. 3.8-8).

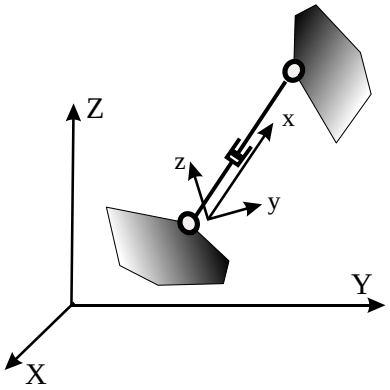



Рис. 3.8-8

При использовании глобальной системы координат рассматривается проекция взаимной скорости на соответствующие оси координат (рис. 3.8-9), как будто демпфирующее устройство вмонтировано между начальным узлом и промежуточной точкой, реализующей указанное направление и имеющей те же скорости, что и конечный узел.

КЭ-57 может использоваться для динамических расчетов только в режиме **Прямое интегрирование уравнений движения.** Другие режимы никак не реагируют на его присутствие в расчетной схеме.

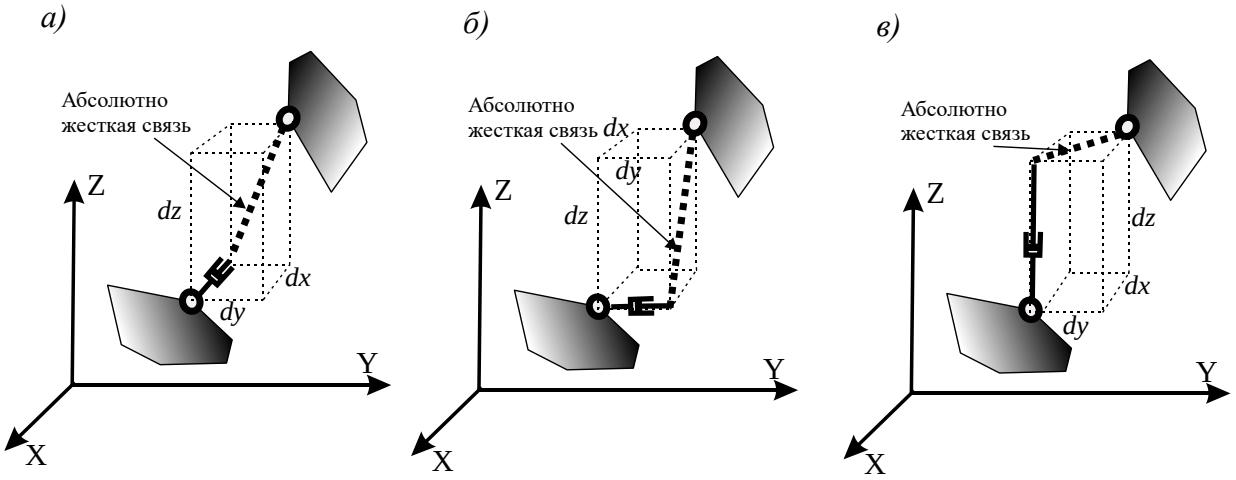



Рис. 3.8-9

### Жесткое тело (тип КЭ – 100)

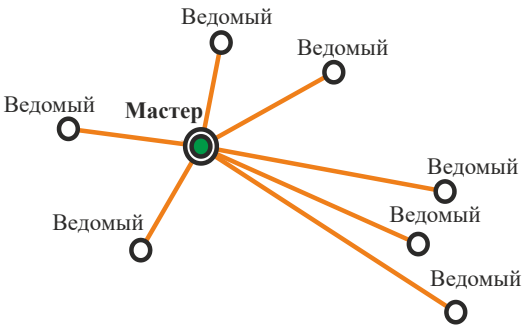



Рис. 3.8-10.

Элемент имеет произвольное число узлов, которые будут связаны друг с другом, как в случае их объединения, абсолютно жестким телом. (см. разд. 2.2).

На рис. 3.8-10 представлено схематическое изображение жесткого тела. По числу степеней свободы схемы задаются признаки связи узлов: 1 – узлы связаны в данном направлении (повороте), 0 – нет.

Подробное описание данного конечного элемента см. в статье [ 86].

### Псевдоэлемент, предназначенный для моделирования элементов, исключенных из расчетной схемы (тип КЭ – 200)

Данный КЭ предназначен для моделирования элементов, исключенных из расчетной схемы, без изменения порядка нумерации оставшихся элементов. Используется только при задании исходных данных в текстовом формате.

## 3.9. Литература к главе Библиотека Конечных Элементов


1. Амбарцумян С.А. Теория анизотропных пластин (прочность, устойчивость и колебания). – М.: Наука, 1987. – 360 с.
2. Баженов В.А., Перельмутер А.В., Шишов О.В. Строительная механика. Компьютерные технологии и моделирование. – М.: СКАД СОФТ, 2014. – 911с.
3. Бате К.-Ю. Методы конечных элементов. – М.: Физматлит, 2010. – 1024 с.
4. Бате К., Вилсон Е. Численные методы анализа и метод конечных элементов. – М.: Стройиздат, 1982. – 448 с.
5. Белкин А.Е., Гаврюшин С.С. Расчёт пластин методом конечных элементов. – М.: МГТУ, 2008. – 232 с.
6. Васидзу К., Вариационные методы в теории упругости и пластичности. — М.: Мир, 1987. — 544 с.
7. Вериженко В.Е. Пискунов В.Г., Карпиловский В.С., и др. Расчет неоднородных пологих оболочек и пластин методом конечных элементов. — Киев: «Вища школа», — 1987. — 200 с.
8. Власов В.З., Леонтьев Н.Н., Балки, плиты и оболочки на упругом основании. — М.: Гос. изд-во ф.-м литературы, 1960. — 492 с.
9. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы. – М.: Мир, 1984. – 428 с.
10. Доннелл Л.Г., Балки, пластины и оболочки. — М.: Гл. ред. ф.-м. наук, 1982. — 568 с.
11. Евзеров И.Д. Оценки погрешности несовместных конечных элементов плиты. Деп. в УкрНИИНТИ, №1467. – Киев, 1979. – 9с.
12. Евзеров И.Д. Оценки погрешности по перемещениям при использовании несовместных конечных элементов. // Численные методы механики сплошной среды, Новосибирск, 1983, том 14, №5. – С. 24–31.
13. Евзеров И.Д. Сходимость МКЭ в случае не принадлежащих энергетическому пространству базисных функций. // Вычисления с разреженными матрицами. – Новосибирск: ВЦСО АН СССР. 1981. – С. 54–61.
14. Евзеров И.Д, Здоренко В.С. Сходимость плоских конечных элементов тонкой оболочки. // Строительная механика и расчет сооружений. 1984, №1. – С.35–40
15. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 541 с.
16. Зенкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимации. – М.: Мир, 1986. – 318 с.
17. Зенкевич О, Чанг И. Метод конечных элементов в теории сооружений и в механике сплошных сред. – М.: Недра,1974. – 238 с.
18. Карпиловский В.С. Исследование и конструирование некоторых типов конечных элементов для задач строительной механики. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.03 – «Строительная механика». – Киев: Национальный транспортный университет (КАДИ), 1982. – 179 с.
19. Карпиловский В.С., Кудашов В.И., Цветков Д.Н. Библиотека изопараметрических конечных элементов вычислительного комплекса «ЛИРА» // Известия ВУЗов. Строительство и архитектура. 1987, №7. – С.28–32.
20. Карпиловский В.С., Лоза И.В. Несовместный четырехугольный конечный элемент балки–стенки. Деп. в УкрНИИНТИ, №2446УК–86, 1985. – 24с.

21. Карпиловский В.С. Новый совместный четырехугольный конечный элемент балки–стенки с вращательными степенями свободы. // Сборник трудов II Международной научно–практической конференции «Сучасні методи і проблемно–орієнтовані комплекси розрахунку конструкцій і їх застосування у проектуванні і навчальному процесі» (Киев, 26–27 сентября 2018 года). Киев: 2018. – С.57–59.
22. Карпиловский В.С. Конструирование несовместных конечных элементов. Киев: Деп. в УкрНИИНТИ, 1980, №2153. 49с. URL: https://scadsoft.com/download/Karpil1980.pdf
23. Карпиловский В.С. Метод конечных элементов и задачи теории упругости. . – Киев: София-А, 2022. – 276 с. URL: https://scadsoft.com/download/KVSBook2022.pdf
24. Карпиловский В.С. Треугольный шестиузловой конечный элемент плиты. // Известия ВУЗов. Строительство и архитектура, 1989, №6. – С. 35–39.
25. Карпиловский В.С. Четырехугольный восьмиузловой конечный элемент плиты // Строительная механика и расчет сооружений, 1990, №2. – С. 13–17.
26. Карпиловский В.С. Четырехугольные конечные элементы для решения плоской задачи теории упругости. // Системы автоматизированного проектирования объектов строительства. – Киев: Будівельник, 1991. – С.35–43.
27. Киселев В.А. Строительная механика. Специальный курс. Динамика и устойчивость сооружений. – М.: Стройиздат, 1980. – 616 с.
28. Клаф Р. Метод конечного элемента в решении плоской задачи теории упругости. – В сб.: Расчет строительных конструкций с применением ЭВМ/под ред. А.Ф.Смирнова. – М.: Стройиздат, 1967. – С. 142–170.
29. Клемперт Ю.З., Париков В.И., Сливкер В.И., О процедуре вычисления матрицы жесткости призматического стержня. // Расчет пространственных конструкций. Вып.16. – М.: Стройиздат, 1974. – С. 179–189.
30. Лалин В. В.,Яваров А. В.,Орлова Е.С.,Гулов А. Р.. Метод конечных элементов с точными функциями формы в задачах устойчивости стержня Тимошенко. // Гидротехническое строительство. 2019, №6. – С.45–52. URL: http://www.gts.energy–journals.ru/index.php/GTS/article/view/655
31. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория упругости. – М.: Физматлит, 2003. – 264 с.
32. Лехницкий С.Г. Теория упругости анизотропного тела. – М.: Наука, 1977. – 416 с.
33. Лурье А.И. Нелинейная теория упругости. – М. Наука, 1980. – 512 с.
34. Лурье А.И. Пространственные задачи теории упругости. – М: ГИТТЛ, 1955. – 491 с.
35. Люстерник Л.А., Соболев В.И. Элементы функционального анализа. – М.: Наука, 1965. – 520 с.
36. Ляв А. Математическая теория упругости. – М.: 1935. – 674 с.
37. Михлин С.Г. Вариационные методы в математической физике. –М.: Наука,1970. – 512с.
38. Немчинов Ю.И. Расчет пространственных конструкций (метод конечных элементов). – Киев: Будівельник, 1980. – 232 с.
39. Новацкий В. Теория упругости. – М.: Мир, 1975. – 882 с.
40. Партон В.З., Перлин П.И. Методы математической теории упругости. – М.: Наука, 1981. – 689 с.
41. Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Особенности алгоритмизации метода перемещений при учете дополнительных связей // Метод конечных элементов и строительная механика: Тр.ЛПИ, №349, 1976. – С.28–36.
42. Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. – М.: Изд-во. ДМК Пресс, 2007. – 596 с.
43. Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Устойчивость равновесия и родственные проблемы. – М.: Изд-во СКАД СОФТ, 2010. – Том 1 – 704с., том 2 – 672с., том 3 – 388 с.
44. Пискунов В.Г., Карпиловский В.С. и др. Расчет крановых конструкций методом конечных элементов. – М.: Машиностроение, 1991. – 240 с.
45. Подгорный А. Н., Марченко Г. А., Пустынников В. И. Основы и методы прикладной теории упругости. – Киев: Вища школа, 1981. – 328 с.
46. Постнов В.А., Хархурим И.Я., Метод конечных элементов в расчетах судовых конструкций. — Л. Судостроение, 1974. — 342 с.
47. Погорелов И.И. Строительная механика тонкостенных конструкций. – СПб.: БХВ-Петербург, 2007. – 518 с.
48. Работнов Ю. Н. Механика деформируемого твёрдого тела. – М.: Наука, 1979. – 744 с.
49. Рассказов А.О., Карпиловский В.С., Харченко Н.Г., Конечный элемент многослойной пологой ортотропной оболочки. Деп. в УкрНИИНТИ, 223Ук-Д84, 1984.
50. Рассказов А.О., Соколовская И.И., Шульга Н.А., Теория и расчет слоистых ортотропных пластин и оболочек. — Киев: Вища школа, 1986, — 192 с.
51. Ректорис К. Вариационные методы в математической физике и технике. – М.: Мир, 1985. – 590 с.

52. Ржаницын А.Р. Строительная механика. – М.: Высшая школа, 1982. – 400 с.
53. Розин Л. А. Задачи теории упругости и численные методы их решения. – СПб.: Изд–во. СПбГТУ, 1998. – 530 с.
54. Розин Л.А. Вариационные постановки задач для упругих систем. – СПб.: Изд–во. СПбГТУ, 1978. – 222 с.
55. Розин Л.А. Стержневые системы как системы конечных элементов – Л.: Изд–во ЛГУ, 1975. – 237 с.
56. Свойский Ф.М. Граничные условия для конечных элементов с вращательными степенями свободы. – СПб.: НОУ Экспресс, 2005. – 106 с.
57. Сливкер В.И. Строительная механика. Вариационные основы. – М.: АСВ, 2005. – 708 с.
58. СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85* (с Изменениями N 1, 2, 3) / Свод правил от 03 декабря 2016 г.
59. СНиП 2.02.01-83*. Основания зданий и сооружений. — М.: Стройиздат, 1984.
60. Соляник-Красса К.В., Осесимметричная задача теории упругости. — М.: Стройиздат, 1987. —338 с.
61. Стренг Г., Фикс Дж. Теория метода конечных элементов. – М.: Мир, 1977. – 349 с.
62. Сьярле Ф. Метод конечных элементов для эллиптических задач. – М.: Мир, 1980. – 512 с.
63. Тер-Мартиросян, Механика грунтов, Москва. – М.: ИАСВ, 2009. – 552 с.
64. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. – М.:Наука, 1975. – 576 с.
65. Тимошенко С.П., Войновский–Кригер С. Пластинки и оболочки. – М.: Наука, 1966. – 636 с.
66. Тимошенко С.П. – Курс теории упругости. – Киев: Наукова думка, 1972. – 508 с.
67. Тимошенко С.П. Пластинки и оболочки. – М.: Гостехиздат, 1948. – 388 с.
68. Тимошенко С.П. Устойчивость стержней, пластин и оболочек. – М.: Наука, 1971. – 880 с.
69. Adini A., Clough R.W. Analysis of plate bending bythe finite element Method. – NSF Report, G7337, 1961.
70. Allman D J. A compatible triangular element including vertex rotations forplane elasticity analysis // Computers and structures, 1984, Vol. 19, pp. l–8. URL: https://doi.org/10.1016/0045-7949(84)90197-4
71. Allman D.J. A quadrilateral finite element including vertex rotations for plane elasticity analysis // International journal for numerical methods in engineering, 1988, Vol. 26, pp. 717–730. URL: https://doi.org/10.1002/nme.1620260314
72. Allman D.J. Evaluation of the constant strain triangle with drilling rotations // International journal for numerical methods in engineering. 1988. V.26. P. 2645–2655. DOI: 10.1002/NME.1620261205
73. Baseley G.P., Cheung Y.K., Irons B.M., Zienkiewicz O.C. Triangular elements in plate bending. – Conforming and noncorforming solutions//Proc. Conf. on Matrix Methods in Structural Mechanics (Nov. 1966), pp. 547–576, Wright Patterson AFB, Oct. 1965
74. Bathe K.J. Finite Element Procedures. New Jersey, Prentice Hall, 1996, 1038 p.
75. Bathe K.J. Dvorkin, E.N. A four–node plate bending element based on Mindlin/Reissner plate theory and a mixed interpolation. //Int. J. Num. Meth. Engrg., 1985, Vol. 21, pp. 367–383. URL: https://doi.org/10.1002/nme.1620210213
76. Bletzinger K.U, Bischoff M, Ramm E: A unified approach for shear–locking–free triangular and rectangular shell finite elements. // Computers & Structures, 2000, Vol. 75, pp. 321–334. DOI:10.1016/S0045–7949(99)00140–6
77. Bogner F.K., Fox R.L., Schmit L.A. The Generation of Interelement Compatible Stiffness and Mass Matrices by the Use of Interpolation Formulas// Proceedings of the Conference on Matrix Methods in Structural Mechanics, Wright–Patterson Air Force Base, Ohio, October 1965, pp. 397–444.
78. Chapelle D., Bathe K.J. The Finite Element Analysis of Shells Funamentals. — Springer–Verlag Berlin Ytidelberg New York, 2003. —330 p.
79. Cazzani A, Atluri S.N. Four–nodes mixed finite elements, using unsymmetric stressed, for linear analysis of membranes// Computational Mechanics, 1993, 11, pp.229–251
80. Chen X.M., Cen S., Sun J.Y., Li Y.G. Four–Node Generalized Conforming Membrane Elements with Drilling DOFs Using Quadrilateral Area Coordinate Methods. //Mathematical Problems in Engineering, 2015, Vol. 3–4, pp. 1–13. DOI: 10.1155/2015/328612
81. Choo Y.S., Choi N., Lee B.C. Choo Y.S., Choi N., Lee B.C. Quadrilateral and triangular 22plate elements with rota–tional degrees of freedom based on the hybrid Trefftz method. // Finite Elements in Analysis and Design, 2006, Vol. 42(11), pp. 1002–1008. DOI: 10.1016/j.finel.2006.03.006
82. Clough R.M., Tocher J. Finite elements stiffness matrices for the analysis of plate bending// Proc. Conf. Matrix Meth. Struct. Mech. – Ohio, 1965
83. Cook R. A plane hybrid element with rotational d.o.f. and adjustable stiffness. // International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1987, Vol. 24(8), pp. 1499–1508. DOI: 10.1002/nme.1620240807
84. Cook R.D. On the Allman triangle and a related quadrilateral element // Computeis andstructures. 1986, Vol. 22(6), pp. 1065–1067. DOI: 10.1016/0045–7949(86)90167–7
85. Fellipa C.A. A study of optimal membrane triangles with drilling freedoms. // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2003, Vol. 192(16–18), pp. 2125–2168. DOI: 10.1016/S0045–7825(03)00253–6

86. Fialko S.Yu. Application of rigid links in structural design models. / International Journal for Computational Civil and Structural Engineering , 2017, 13 (3), 119-137.
87. Fraeijs de Veubeke B. A conforming finite element for plate bending. // International Journal of Solids and Structures, 1968, Vol. 4, pp. 95–108. DOI:10.1016/0020-7683(68)90035-8
88. Irons B.M., Razzaque A. Experience with the path test. // In: The Matematical Foundations of the Finite Element Method with Application to Partial Differential Equations, Academic Press, 1972, pp. 557–587.
89. Iura M. Atluri S.N. Formalation of a membrane finite element with drilling degrees of freedom// Computational Mechanics, 9, 1992, pp.417–428. DOI:10.1007/BF00364007
90. Karpilovskyi V.S. Finite Elements of the Plane Problem of the Theory of Elasticity with Drilling Degrees of Freedom. // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, 2020, Vol. 16(1), pp. 48–72. URL: https://doi.org/10.22337/2587-9618-2020-16-1-48-72
91. Karpilovskyi V.S. Finite Elements for the Analysis of Reissner–Mindlin Plates With Joint Interpolation of Displacements and Rotations (JIDR). // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, 2021, Vol. 17(3), pp. 49–63, URL: https://doi.org/10.22337/2587-9618-2021-17-3-48-62
92. Luo Y., An Efficient 3D Timoshenko Beam Element with Consistent Shape Functions // Adv. Theor. Appl. Mech. 2008. Vol. 1(3). pp. 95–106.
93. Macneal R.H., Harder, R.L. A proposed standard set of problems to test finite element accuracy. // Finite elements in analysis and design, 1985, Vol. 1, pp. 3–20. DOI: 10.1016/0168–874X(85)90003–4
94. MacNeal R.H., Harder R.L. A proposed standart set of problems to test finite element accuracy. Finite Element Anal. Des., 1987, Vol. 1, pp.1793-1799. DOI:10.1016/016-874x(85)90003-4
95. MacNeal R.H., Harder R.L. A refined four-noded membrane element with rotational degrees of freedom // Computers and structures. 1988. V.28. JSbl. pp.75-84. URL:https://doi.org/10.1016/0045-7949(88)90094-6
96. MacNeal R.H., Harder R.L. A refined four–noded membrane element with rotational degrees of freedom. // Computers and structures, 1988, Vol. 28(1), pp. 75–84. DOI:10.1016/0045–7949(88)90094–6
97. Makiett R.N., Marcal P.V. Finite Element Analysis of Nonlinear Structures // Journal Structural Division. – Proc./ASCE, 1968, Vol. 94(9), pp.2081–2105. URL:https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0002066
98. Oden J.T. Finite Elements of Nonlinear Continua.– New York: McGraw Hill Book Company, 1972. – 432p.
99. Oden J.T. Finite Elements of Nonlinear Continua. – Dover Publications, 2006. – 456p.
100. Robinson J: An evaluation of lower order membranes as contained in the MSC/NASTRAN, ASAS and PAFEC systems. Report to the Royal Aircraft Establishment, Farnborough (MOD Contract No. A93b/494), September 1979
101. Wilson E.L, Ibrahimbegovic A. Thick shell and solid elements with independent rotation fields //International journal for numerical methods in engineering, 1991, Vol. 31(7), pp. 1393–1414. DOI: 10.1002/nme.1620310711
102. White D W, Abel J F 1989 Testing of shell finite element accuracy and robustness. Finite Elements // Finite Elements in Analysis and Design, 1989, Vol.6(2), pp. 129-151. URL: https://doi.org/10.1016/0168-874X(89)90040-1
103. Xiao–Ming Chen,Song Cen, Jian–Yun Sun,Yun–Gui L. Four–Node Generalized Conforming Membrane Elements with Drilling DOFs Using Quadrilateral Area Coordinate Methods //Mathematical Problems in Engineering, Vol. 2015, Article ID 328612, 13p. URL:https://doi.org/10.1155/2015/328612
104. Yunus M., Saigal S., Cook R.D. On improved hybrid finite elements with rotational degrees of freedom. //Interntional journal for numerical methods in ingineering, 1989, Vol. 28, pp.785–800. DOI: 10.1002/nme.1620280405
105. Zhang H., Kuong J.S. Eight–node membrane element with drilling degrees of freedom for analysis of in–plane stiffness of thick floor plates// International journal for numerical methods in engineering, 2008, Vol. 76(13), pp. 2117–2136. DOI: 10.1002/nme.2395
106. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. The Finite Element Method. 3 volumes. Planta Tree, Butterworth–Heinemann, 2000, Vol. 1, 690p., Vol. 2, 459p., Vol. 3, 334 p.

# 4. Structure CAD «не только для ОРЛОВ»

*Начинающий… не должен смущаться, если… он обнаружит, что у него не хватает предварительных знаний даже для чтения предварительных сведений.*

П.ХАЛМОШ

Графический интерфейс программы **SCAD** построен на основе технологии MDI (Multi Documented Interface). Это позволяет работать одновременно с несколькими задачами, каждая из которых в режиме подготовки исходных данных (в препроцессоре) использует одно окно. В режиме анализа результатов расчета (в постпроцессоре) количество окон для одной задачи не ограничено. В них могут располагаться как разные фрагменты расчетной схемы, так и различные виды результатов. При этом разные задачи могут одновременно находиться на разных стадиях обработки — подготовки данных, расчета и анализа результатов.

Окно задачи, к которому пользователь обращался последним, считается активным. Соответственно, набор и состояние элементов управления графическим интерфейсом будет соответствовать режиму, в котором находится задача в активном окне.

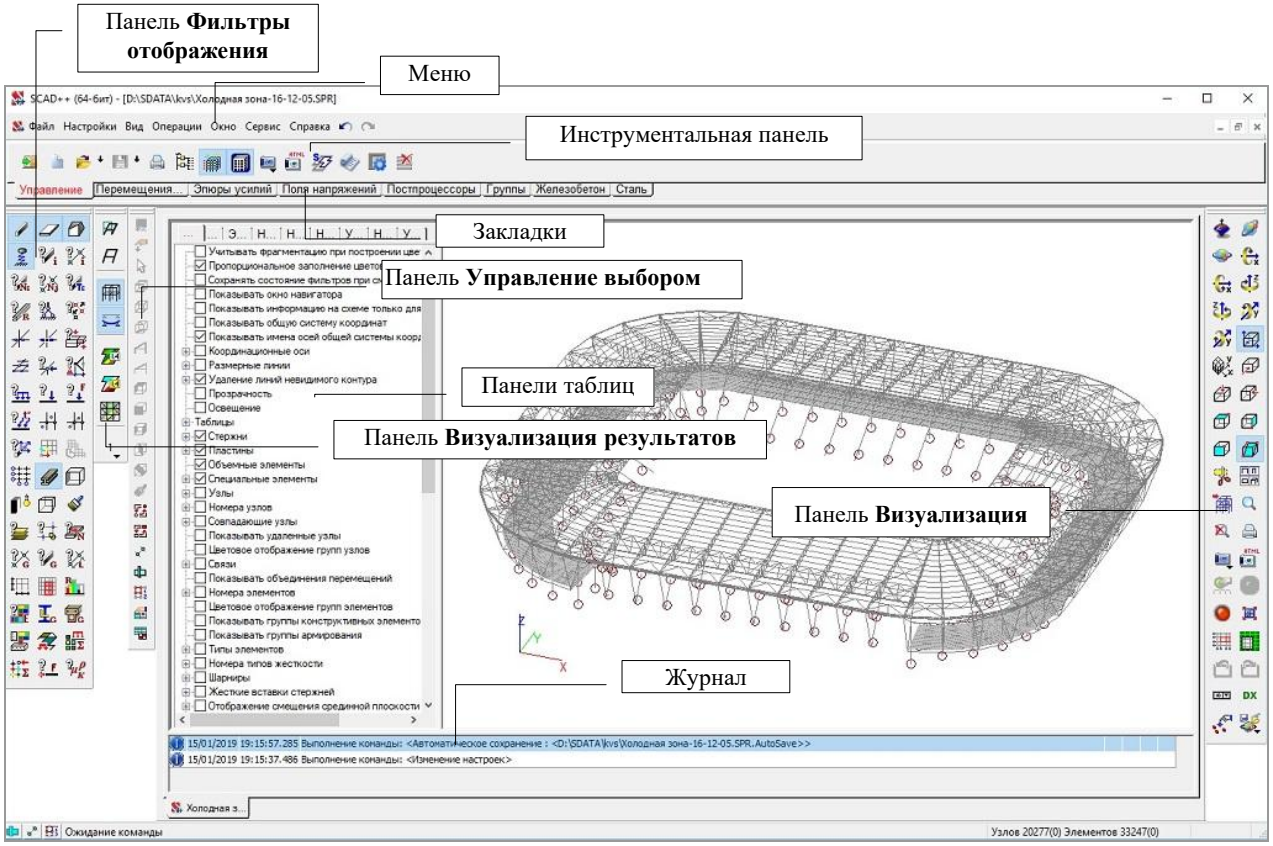



Рис. 4-1. *Общий вид рабочего окна комплекса* **SCAD**

Элементы управления графическим интерфейсом, доступ к данным, операции с окнами (допустимость одновременного присутствия нескольких окон, понятие активного окна и способы активации, возможность перемещения окон и т. п.) реализованы в полном соответствии с правилами, принятыми для операционной среды Windows.

## 4.1. Организация графической среды

Графическая среда пользователя включает следующие основные элементы (рис. 4-1):

**Меню** — расположено в верхней части окна **SCAD** под заголовком и содержит разделы, набор которых зависит от установленного режима работы.

**Инструментальные панели** — являются основным элементом графического интерфейса, который используется для вызова операций формирования модели и анализа результатов расчета. Панели состоят из набора кнопок и списков. Как правило, в каждую панель входят операции одного назначения, например, для работы с узлами или элементами, анализа перемещений или усилий. Переключение панелей выполняется указанием курсора на «закладки» с их наименованием. Функции и режимы инструментальных панелей пре- и постпроцессора описаны в соответствующих разделах.

**Фильтры отображения** — фильтры служат для управления отображением расчетной схемы. С их помощью выполняется вывод на экран практически всех параметров модели, включая номера элементов и узлов, нагрузок, условий опирания и примыкания, жесткостных характеристик и т. п. Кроме того, фильтры используются для выбора способа отображения модели (проволочное, реалистичное с удалением линий невидимого контура и др.).

Фильтры отображения продублированы в виде древовидной структуры на панели, расположенной вдоль левой грани каждого окна.

Панель **Визуализация** — включает кнопки управления позиционированием схемы на экране, фрагментацией схемы, а также выводом текущего изображения на печать.

Панель **Управление выбором** — включает набор кнопок, используемых для выбора курсоров, назначения правил селекции узлов и элементов в зависимости от их положения в схеме, а также для организации взаимодействия между графическим и табличным представлением модели.

Панель **Визуализация результатов** — появляется в режиме графического анализа результатов и используется для управления отображением результатов расчета на расчетной схеме.

**Панели таблиц** с исходными данными и результатами расчета — расположены у левой границы каждого окна задачи и переключаются с помощью закладок (панели таблицы находятся там же, где и дублирующая панель фильтров отображения).

**Журнал** — часть окна, расположенная вдоль его нижней границы, которая содержит информацию о выполненных операциях в процессе работы с задачей в текущем сеансе работы, а также сообщения об ошибках и предупреждения.

**Диалоговые окна** — в тех случаях, когда для выполнения операции требуются дополнительные данные или установки, на экран выводится соответствующее диалоговое окно. Диалоговые окна включают различные элементы управления — таблицы, кнопки, поля ввода, списки и т. п. Ввод, удаление или изменение данных выполняется с клавиатуры. Если выход из диалогового окна выполняется нажатием кнопки **ОК**, то все выбранные установки запоминаются. Если для выхода использована кнопка **Cancel** (Отмена), то новые установки не сохраняются, а при работе будут использоваться выбранные ранее или принимаемые по умолчанию.

### Меню

Под выражением «Выбрать в меню …» подразумевается выполнение последовательности операций:

- установить курсор на раздел меню и нажать левую кнопку мыши;
- после раскрытия списка операций перемещением курсора по вертикали выбрать строку с наименованием нужной операции и нажать левую кнопку мыши.

Состав и содержание меню зависит от режима работы, в котором находится активная задача. Например, при вызове программы из программной группы системы **SCAD Office** стартовое меню включает пять разделов — **Файл**, **Настройки**, **Вид**, **Сервис** и **Справка**. После загрузки проекта меню будет включать семь разделов — **Файл**, **Настройки**, **Вид**, **Операции**, **Окно**, **Сервис** и **Справка**.

Меню раздела **Файл** (полный набор) может включать более двадцати пунктов. В некоторых режимах работы количество пунктов меньше. Кроме того, некоторые пункты могут быть

недоступными. Например, пункт **Сохранить проект** окажется закрытым, если проект не загружен или не изменялся.

Полный список разделов меню ***Файл*** включает:

- **Новый** — создание нового проекта;
- **Открыть**... — открыть существующий проект;
- **Прочитать проект из текстового формата...** — загрузка проекта в формате текстового файла исходных данных **SCAD++**;
- **Прочитать проект из текстового формата (предыдущие версии)** — загрузка проекта в формате текстового файла исходных данных **SCAD** версий 11.xx и др.;
- **Импорт** — загрузка проектов, созданных другими приложениями в форматах DXF, DWG, SDNF, IFC и др.;
- **Сохранить проект** — запись проекта в файл, без изменения имени файла;
- **Сохранить проект как...** — запись проекта в файл с новым именем;
- **Сохранить проект для SCAD 11.xx** — запись проекта в файл в формате версии 11.xx;
- **Закрыть проект** — закрытие текущего проекта;
- **Открыть среду** — загрузить сохраненный ранее файл со списком активных проектов;
- **Сохранить среду** — сохранение в файле списка активных проектов;
- **Сохранить среду под другим именем** — сохранение файла со списком активных проектов под новым именем;
- **Закрыть среду** — завершение работы со всеми проектами, открытыми при загрузке среды;
- **Сохранить данные в виде текста** — преобразование данных из внутренних форматов проекта в текстовый файл в форматах входного языка;
- **Экспорт** — экспорт данных в стандартных форматах или форматах других приложений;
- **Переслать** — отправка проекта по электронной почте;
- **Предварительный просмотр** — просмотр текущего изображения схемы перед печатью;
- **Печать** — вывод текущего изображения схемы на печать;
- **Файлы рабочей среды** — список файлов, содержащих описание рабочей среды;
- **Выход** — завершение работы с программой.

В нижних строках раздела **Файл** записаны имена файлов последних десяти проектов, с которыми работал пользователь. В тех случаях, когда предполагается работа с одним из этих проектов, достаточно выбрать его из этого списка.

Полный список разделов меню ***Настройки*** включает:

- **Немедленное выполнение** — эта опция становится доступной при выполнении операций с выбранными узлами и элементами и обеспечивает их немедленное выполнение без подтверждения кнопкой **ОК**;
- **Настройка цветовой схемы** — вызывает многостраничное диалоговое окно **Настройка цветов**, в котором назначается цвет отображения всех атрибутов и объектов расчетной схемы, схем загружения, результатов расчета и т. п.;
- **Параметры расчета** — вызывается одноименное диалоговое окно, в котором выполняется выбор метода решения и связанные с этим настройки точности решения статических и динамических задач, контроля решения и анализа устойчивости, допустимые отклонения формы конечных элементов и т. п.;
- **Настройка параметров среды** — открывает диалоговое окно, в котором назначаются параметры настройки графической среды. К ним относятся, например, включение режима раздельного отображения пластинчатых элементов, назначение отступа между концом элемента и узлом при объемном отображении профилей стержневых элементов, включение «штриховки» распределенной нагрузки на стержневых элементах, назначение точности оценки совпадающих узлов, и др. Подробнее вопросы настройки среды рассматриваются в разделе 10.4;
- **Настройка шагов арматуры** — назначается список допустимых расстояний между арматурными стержнями, который используется при подборе арматуры;

- **Настройка норм проектирования** — в одноименном диалоговом окне выполняется назначение норм, в соответствие с которыми будет выполняться решение задач проектирования элементов стальных и железобетонных конструкций;
- **Настройки** — вызывается многостраничное диалоговое окно, в котором выполняются назначения для текущей задачи единиц измерения входных и выходных данных, языка интерфейса, шрифтов и т. п.;
- **Экспресс-настройка единиц измерения** — в диалоговом окне **Параметры** выполняется назначение основных единиц измерения, на основе которых автоматически принимаются все единицы входных данных и результатов расчета. Следует отметить, что единицы измерения как исходных данных, так и результатов могут неоднократно меняться в процессе формирования модели или анализа результатов;
- **Настройка оформления листов для печати** — вызывается одноименное диалоговое окно, в котором назначаются элементы оформления графических материалов, выводимых на печать;
- **Назначение рабочих директорий** — вызываемое этой операцией одноименное диалоговое окно позволяет указать имена каталогов, из которых по умолчанию следует взять файл проекта и куда следует помещать рабочие файлы и файлы результатов. Изменить назначение каталогов можно только при условии, что ни один проект не активен, т. е. перед вызовом операции следует предварительно закрыть активный проект (операция **Закрыть проект** в меню ***Файл***);
- **Настройки принтера** — стандартная процедура Windows для выбора типа принтера и назначения характеристик;
- **Настройка визуализации таблиц результатов** — выбор программы (текстового редактора) визуализации текстовых документов, включая таблицы исходных данных и результатов.

Меню ***Вид*** используется для управления отображением схемы и дублирует ряд операций панели **Визуализация**, включая **Вращение**, **Исходное положение**, **Проекции**, а также выбор режима отображения (**GDI** или **DirectX**). Кроме того, в меню предусмотрено возможность включения и отключения панелей фильтров отображения, визуализации, управления выбором и визуализации результатов.

Меню ***Операции*** дублирует кнопки активного раздела инструментальной панели.

Меню ***Окно*** является типичным для многооконных Windows-приложений и позволяет создать новое окно (только в постпроцессоре), а также автоматически упорядочить окна по разным правилам.

Меню ***Сервис*** в препроцессоре предназначен для вызова различных калькуляторов: стандартного калькулятора Windows, формульного калькулятора и преобразователя единиц измерений.

Меню ***Справка*** содержит пункты, позволяющие получить справочную информацию о комплексе в целом и подробные сведения о подготовке исходных данных, чтении результатов, управлении режимами и т. п.

## Инструментальные панели

Инструментальные панели являются одним из основных элементов управления комплексом **SCAD**. Активация панелей выполняется путем указания курсором на закладки, набор которых зависит от режима работы (подготовка данных или анализ результатов).

Набор закладок в режиме подготовки данных зависит от вида формируемой модели — на основе конечных элементов или укрупненная модель, на основе конструктивных элементов. При формировании конечно-элементной модели доступен следующий набор закладок: **Управление**, **Схема**, **Назначение**, **Узлы и Элементы**, **Загружения**, **Группы, Специальные**. Если схема готовится для расчета с учетом очередности возведения сооружения, то кроме указанных закладок открывается доступ к закладке **Монтаж**. В случае работы с укрупненными элементами (препроцессор **ФОРУМ**) доступны закладки **Управление**, **Схема**, **Операции с узлами**, **Операции с элементами**, **Нагрузки**.

При анализе результатов расчета, включая экспертизу и подбор арматуры в элементах железобетонных конструкций и сечений элементов стальных конструкций, доступны закладки

**Управление**, **Перемещения**, **Эпюры усилий**, **Поля напряжений**, **Постпроцессоры**, **Группы**, **Железобетон**, **Сталь**.

### Пиктограммы

В инструментальных панелях для инициализации операций используются кнопки с пиктограммами (или, как их называют в Windows, — иконы). Ограниченное пространство кнопки не всегда позволяет сделать пиктограмму адекватной смыслу операции, которую она символизирует. Для облегчения освоения комплекса и упрощения работы с ним используются различные средства. Во-первых, это информационная строка, в которую в момент попадания курсора в поле кнопки выводится краткое описание соответствующей кнопке операции. Во-вторых, это приведенная ниже система символических изображений в пиктограммах, которая отражает суть операции и является общей для всего комплекса.

 — выполнить операцию (кнопка **ОК**);

 — отказаться от выполнения установленной операции;

 — восстановить исходный вид схемы;

 — запомнить загружение;

 — операции для работы с элементами;

 — буква «R» — жесткостные характеристики;

 — операции для работы с узлами;

 — знак «плюс» — добавление узлов или элементов;

 — стрелка влево — возврат удаленных узлов или элементов;

 — знак «минус» — удаление узлов или элементов;

 — знак «деление» — дробление элементов;

 — буква «С» — создание схемы или контура;

 — «вопросительный знак» — отображение или получение информации.

Если в правом нижнем углу пиктограммы изображена стрелка, направленная вправо, например  , то это означает, что при нажатии кнопки будет раскрыта группа кнопок управления соответствующим режимом. Если стрелка направлена вниз, например,  , то при нажатии кнопки появится выпадающее меню.

### Кнопки с дополнительными возможностями

Некоторые кнопки включают дополнительную стрелку, расположенную с правой стороны. Наличие стрелки означает, что предусмотрено несколько вариантов выполнения операции. При этом нажатие собственно кнопки приводит к выполнению "стандартного" действия, а нажатие на стрелку — к появлению меню для выбора альтернативных возможностей. Например, выполнение операции **Сохранить** —  при нажатии кнопки приведет к сохранению модели под текущим именем, а при нажатии на стрелку — появится меню, в котором можно выбрать пункт **Сохранить как** и произвести сохранение модели под другим именем.

## Графики

В тех случаях, когда данные отображаются в виде графиков (см. рис. 4.1-1), предусмотрены специальные элементы управления, которые включают кнопки вызова операций масштабирования изображения и оформления графика.

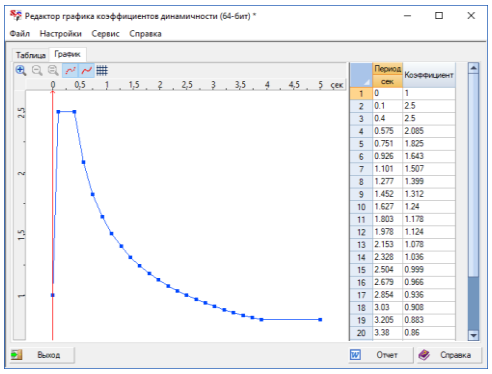



Рис. 4.1-1. *Отображение графиков*

Знаком плюс отмечена кнопка увеличения масштаба, каждое нажатие которой вызывает удвоение размеров графика. Кнопка, отмеченная знаком минус, используется для пошагового уменьшения изображения и работает только после кнопки «плюс». Возврат к исходному размеру графика можно выполнить за один шаг, используя кнопку «равно».

Кнопки оформления позволяют включать или отключать отображение сетки, а также вывод точек, на основании которых построен тот или иной график. Как правило, рядом с графиком расположена таблица с численным представлением тех же данных.

## Фильтры

Фильтры служат для управления отображением расчетной схемы. В программе предусмотрены фильтры двух видов — управления отображением информации на расчетной схеме (в дальнейшем — **фильтры отображения**) и управления отображением собственно расчетной схемы (**фильтры визуализации**). Фильтры первого вида позволяют не только показать на расчетной схеме различные характеристики модели, но и назначить вид и правила представления этих характеристик, а также отобрать однотипные по указанным свойствам объекты. Кроме того, фильтрация может выполняться одновременно по разным свойствам объектов. Например, с помощью фильтра можно из всех элементов отобрать элементы, имеющие одинаковые жесткостные характеристики, лежащие в заданной плоскости и принадлежащие определенной группе.

Панель **Фильтры отображения** (рис. 4.1-2, *а*) оформлена в виде специального окна, которое содержит набор кнопок для выбора параметров отображения. Показать или скрыть это окно можно одноименной кнопкой —  , размещенной в разделе **Управление** инструментальной панели и продублированной в меню ***Вид*** (раздел **Панели инструментов**). Панель **Фильтры отображения** может менять размеры и находиться в любой части экрана.

Для более детальной настройки фильтров отображения используется многостраничное диалоговое окно **Настройка фильтров отображения информации**, которое появляется после выбора курсором кнопки соответствующего фильтра на панели фильтров и нажатия ***правой*** кнопки мыши. Если пользователь изменил настройку того, или иного фильтра, то соответствующая кнопка будет иметь дополнительный индикатор, свидетельствующий об изменении стандартных настроек. Например, фильтр отображения стержневых элементов (в стандартном и модифицированном состояниях) выглядит так:  ,  .

Как уже отмечалось выше, фильтры продублированы в виде древовидной структуры, расположенной вдоль левой границы окна задачи. Настройка фильтров выполняется с помощью системы маркеров (рис. 4.1-3).




*а*) *б*) *в*) *г*)

Рис. 4.1-2. *Панели фильтров*

*а*) Фильтры отображения, *б*) Визуализация, *в*) Управление выбором, *г*) Визуализация результатов

Элементы управления панели **Визуализация** предназначены для манипулирования изображением схемы. Это вращение и фрагментация, проецирование на плоскости основной системы координат и выбор технологии представления графической информации на экране (растровая или векторная).

С точки зрения размеров и размещения панель **Визуализация** (рис. 4.1-2, *б*) имеет те же свойства, что и панель **Фильтры отображения**. Показать или скрыть ее можно кнопкой  .

Панель **Управление выбором** (рис. 4.1-2, *в*) используется для управления селекцией узлов или элементов в процессе работы со схемой. Кроме кнопок назначения вида курсора она включает элементы, обеспечивающие взаимодействие графической и табличной информации, а также ряд кнопок, которые можно рассматривать как фильтры, позволяющие выбирать объекты, занимающие определенное положение в схеме, например, вертикально расположенные пластины.

Панель **Визуализация результатов** (рис. 4.1-2, *г*) доступна только в постпроцессоре и служит для настройки формы отображения изополей, а также для управления выводом значений анализируемого фактора на эпюрах, изолиниях и изополях.

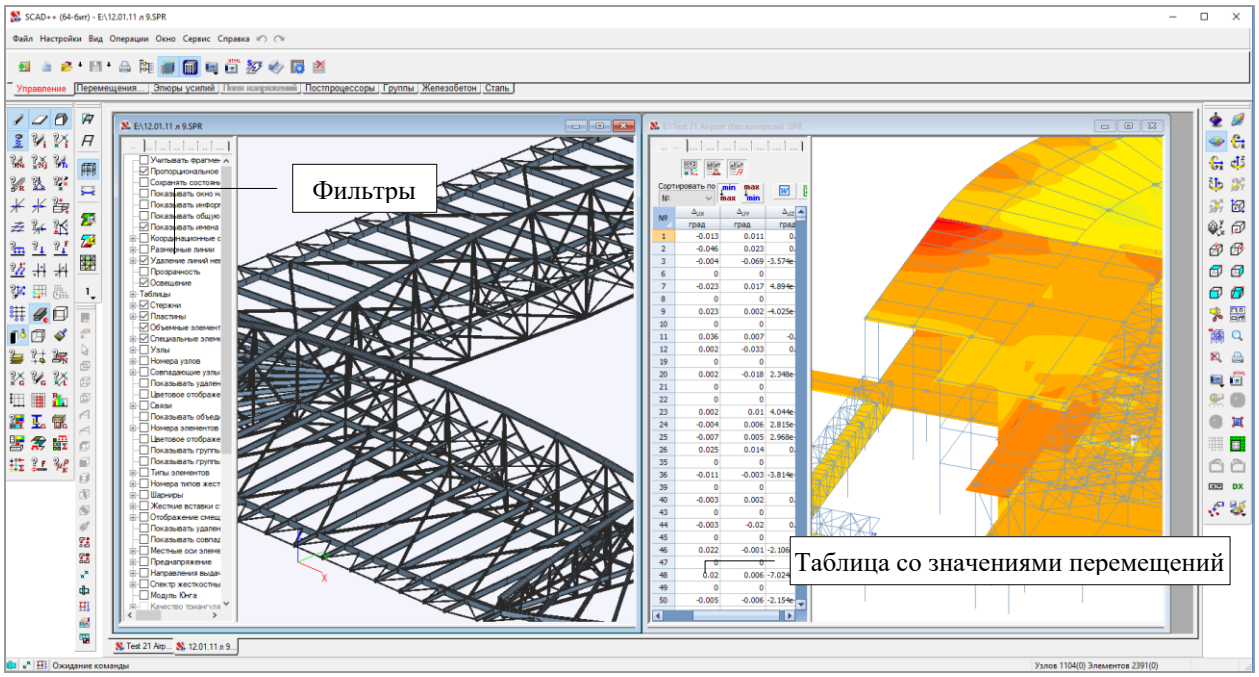



Рис. 4.1-3. *Таблицы результатов и панель фильтров*

Более подробно работа с инструментальными панелями и фильтрами рассматривается в соответствующих разделах данной книги.

## Окна

В комплексе **SCAD** различают окна следующих основных видов:

- стартовое окно — включает меню и инструментальную панель **Общие операции**, используется для создания или загрузки проекта;
- окно управления проектом — включает дерево проекта и используется для выбора режима работы;
- окно с расчетной схемой — используется в препроцессоре и постпроцессоре;
- окно процессора — используется при расчете;
- диалоговые окна — используются для подготовки данных и задания параметров, управляющих процессом обработки информации.

Подробная информация о правилах работы с окнами приводится ниже в соответствующих разделах книги. Активация окон выполняется или с помощью закладок, расположенных в левом нижнем углу рабочего поля, или указанием курсора на окно.

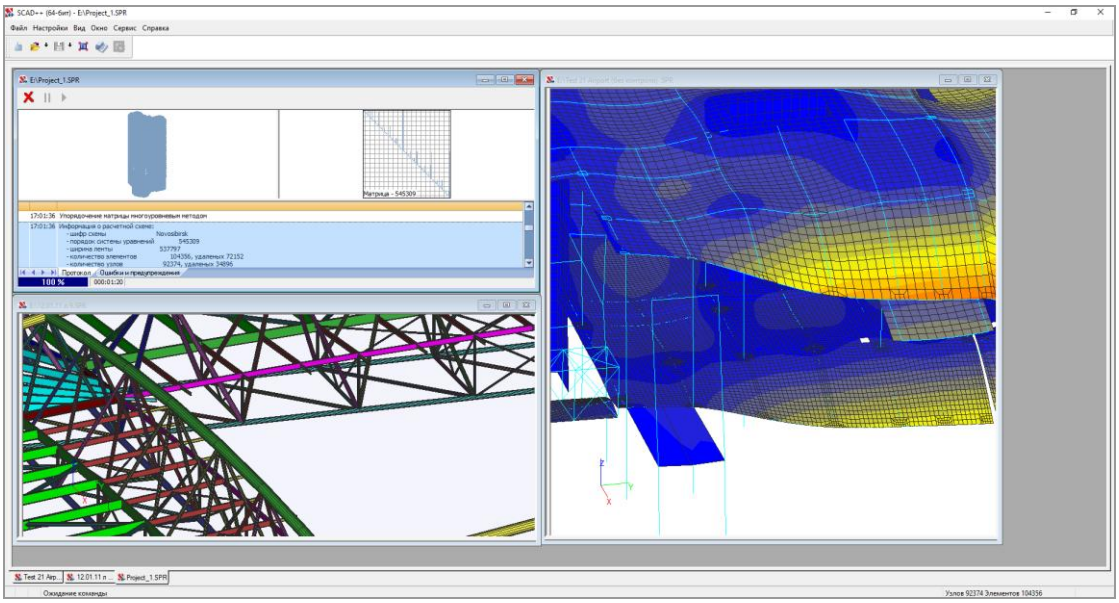


Рис. 4.1-4. *Реализация* **MDI** *интерфейса в комплексе* **SCAD**

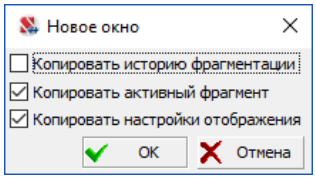



Рис. 4.1-5. *Диалоговое окно* **Новое окно**

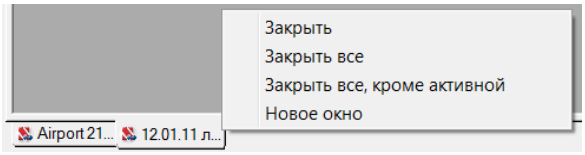



Рис. 4.1-6. *Меню закладок*

При работе в постпроцессоре раздел меню ***Окно*** содержит пункт **Новое окно**, с помощью которого можно создать несколько окон с информацией о результатах расчета. Это позволяет одновременно анализировать в нескольких окнах различные факторы или фрагменты схемы, например, перемещения в одном окне и напряжения — в другом. При активации данного пункта меню появляется диалоговое окно (рис. 4.1-5), в котором можно указать какие параметры существующего окна должны быть перенесены в новое окно (история фрагментации, активный фрагмент, настройки отображения).

Нажатие правой клавиши мыши на закладке окна приводит к появлению меню (рис. 4.1-6), которое позволяет выполнить следующие действия:

- закрыть соответствующее окно;
- закрыть все окна;
- закрыть все окна, кроме того, которое соответствует закладке;
- создать новое окно.

### Мышь



Среда Windows ориентирована на работу с мышью, и поэтому большинство операций выполняется с ее помощью. Синхронно с перемещением мыши по полю экрана перемещается курсор. Для инициализации операции курсор необходимо подвести к элементу управления, который «отвечает» за эту операцию, и нажать левую кнопку мыши. В зависимости от вида элемента управления нажатие кнопки вызовет определенные действия (например, «вдавит» изображенную на экране кнопку).
Операция «дважды нажать левую кнопку мыши» или «двойной щелчок» подразумевает двойное нажатие этой кнопки с очень коротким интервалом (интервал можно установить при настройке среды Windows).

Кроме того, в **SCAD** используются следующие элементы управления мыши:
- правая кнопка (нажатие при положении курсора в рабочем поле окна) — появляется выпадающее меню управления выбором узлов и элементов;
- правая кнопка (нажатие при «наезде» курсора на одну из кнопок фильтров отображения) — вызов многостраничного диалогового окна настройки фильтров отображения;
- средняя кнопка мыши (колесо) — удержание в нажатом положении с одновременным перемещением курсора приводит к перемещению изображения расчетной схемы в окне;
- колесо мыши (вращение колеса) — изменение масштаба изображения расчетной схемы в окне.

### Курсоры

В комплексе используются несколько типов курсоров:

 стандартный курсор — для выбора режима или операции;

 перекрестье с центральной мишенью — для выбора одного узла или элемента;

 перекрестье — для выбора одного элемента в режиме связной селекции (см. раздел 6.1);

 перекрестье с изображением прямоугольника — для выбора группы узлов или элементов с помощью рамки прямоугольной формы;

 перекрестье с изображением произвольного многоугольника — для выбора группы узлов или элементов с помощью рамки произвольной формы;

 изменение положения линии-разделителя окна по вертикали (например, увеличение или уменьшение размера панели сообщений);

 изменение положения линии-разделителя окна по горизонтали (например, увеличение или уменьшение размера панели таблиц);

 одновременное изменение положения линий-разделителей по горизонтали и вертикали (например, изменение размера окон при отображении схемы на проекциях);

 курсор-указатель для выбора кнопок управления таблицами;

 курсор для селекции данных в таблицах.

В тех случаях, когда выполняемая операция длится долго, на экран выводится курсор «ожидания» —  . После завершения операции возвращается прежний курсор.

## Диалоговые окна

В комплексе используются различные диалоговые окна. На рис. 4.1-7 показано многостраничное диалоговое окно.

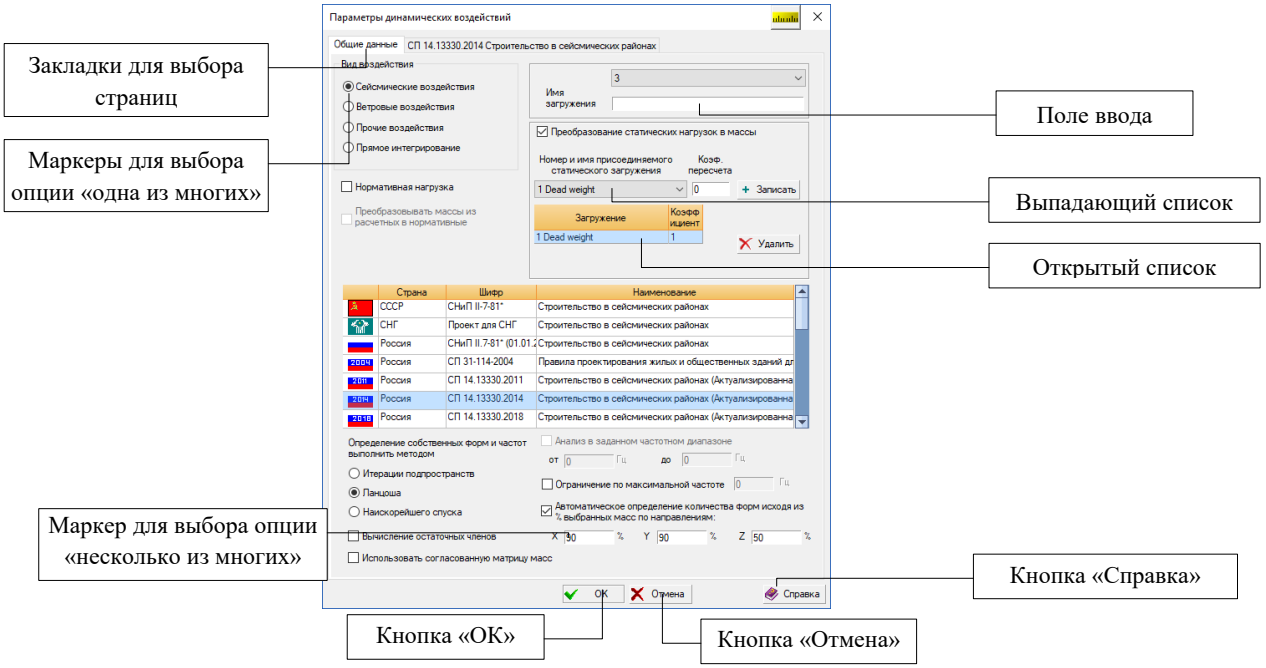



Рис. 4.1-7. *Элементы управления диалоговых окон*

Кроме приведенных на рисунке 4.1-7 элементов управления, в диалоговых окнах используются кнопки-маркеры, движки (ползунки).

В заголовке большинства диалоговых окон имеется кнопка  , нажатие которой вызывает появление диалогового окна **Настройка единиц измерения**, в котором можно оперативно изменить единицы измерения величин в данном диалоговом окне.

Если пользователь открыл несколько расчетных схем и в одной из них (или в нескольких) активированы диалоговые окна (например, диалоговое окно цветовой шкалы), то для того, чтобы разобраться, к какой именно расчетной схеме относится информация в диалоговом окне, достаточно подвести курсор к заголовку диалогового окна. При этом появится всплывающая подсказка с именем файла, к которому относится информация (см. рис. 4.1-8).

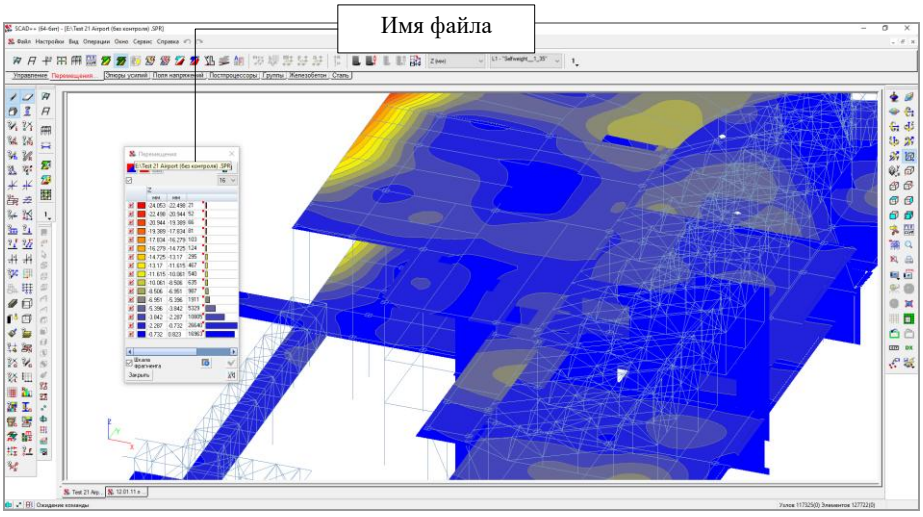



Рис. 4.1-8. *Всплывающая подсказка с именем файла*

## Работа с таблицами

Для ввода табличной информации в диалоговых окнах используются универсальные таблицы. Операции с данными, представленными в табличном виде, выполняются с помощью набора команд (рис. 4.1-9), вызываемого нажатием правой кнопки мыши при размещении курсора в поле таблицы (рис. 4.1-10).

При вводе числовых данных в таблицы необходимо соблюдать следующие правила:

- добавление новых строк в таблицу выполняется нажатием кнопки **Добавить**;
- удаление отмеченных строк выполняется кнопкой **Удалить**;
- разделителем дробной и целой частей числа является знак, указанный при настройке компьютера, например, запятая (раздел **Язык и региональные стандарты** на **Панели управления**). Разделитель в виде точки доступен всегда;
- при вводе чисел с плавающей запятой можно пользоваться экспоненциальной формой представления, например, 3e-5;
- после ввода числа переход к следующей графе этой же строки выполняется нажатием клавиши табуляции — **Tab**, а переход к другой строке этой же графы клавишами ↓ и ↑;
- управление таблицей можно выполнить с помощью выпадающего меню (рис. 4.1-9), которое появляется после нажатия правой кнопки мыши (курсор должен находиться в поле таблицы);
- для отметки нескольких подряд идущих ячеек или строк следует установить курсор на первую из них, нажать **левую** кнопку мыши и, не отпуская ее, протянуть курсор до нужной ячейки или строки;
- для выборочной отметки строк следует нажать клавишу **Ctrl** на клавиатуре и, не отпуская ее, указать курсором на номера отмечаемых строк, фиксируя нужную строку нажатием левой кнопки мыши.

Набор команд управления таблицей включает следующие команды:

- **Копировать** — запись в буфер (**Clipboard**) содержимого отмеченных строк или ячеек (по горизонтали и вертикали);
- **Вставить** — помещает информацию из буфера (**Clipboard**) в таблицу, начиная с отмеченной ячейки. Если в процессе вставки оказывается, что существующих строк не хватает, то они автоматически добавляются. Столбцы не добавляются, т. е. информация справа от последнего столбца пропадает;
- **Добавить строку перед отмеченной** (под отмеченной понимается строка, в которой активна по крайней мере одна ячейка) — добавляется строка перед текущей строкой; все ячейки новой строки получат значения по умолчанию (если другого не оговорено, то равны нулю);
- **Добавить строку после отмеченной** — добавляется строка после текущей строки (команда выполняется по тем же правилам, что и предыдущая);
- **Очистить отмеченные строки** — во все ячейки отмеченных строк вносятся значения по умолчанию (как правило, нули);
- **Удалить отмеченные строки** — удаляются все отмеченные строки;
- **Копировать текущие строки** — в буфер копируется вся строка, независимо от того, выделена она полностью или частично;
- **Вставить текущие строки** — вставка строк, копирование которых выполнялось командой **Копировать текущие строки**.

Следует помнить, что последние две команды перед копированием и вставкой выполняют проверку корректности информации на соответствие формату табличных данных.

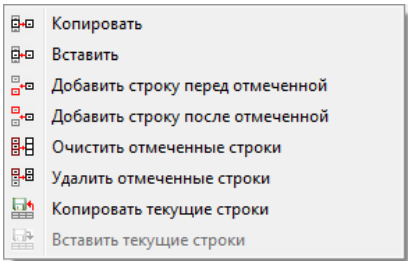



Рис. 4.1-9. *Набор команд для работы с табличными данными*

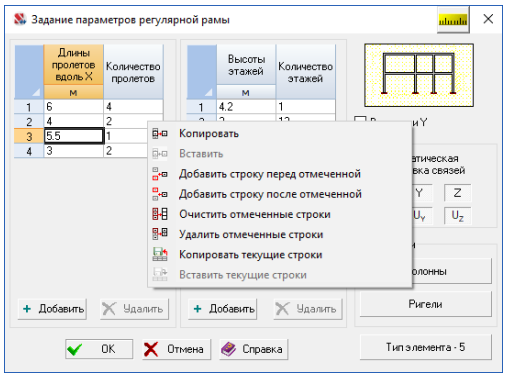



Рис. 4.1-10. *Работа с таблицами*

Команды (**Копировать** и **Вставить**) можно использовать не только для операций с текущей таблицей программы, но и для переноса табличных данных в другие таблицы и приложения, в том числе и не входящие в систему **SCAD Office** (например, MS Excel).

## Табличное представление данных и результатов

В левой части окна, в котором отображается расчетная схема, расположена многостраничная панель с табличным представлением данных (а в постпроцессоре – и с результатами расчета). Закладки позволяют переключать страницы и переходить к анализу того или иного типа данных.

На каждой странице отображается информация по текущему фрагменту расчетной схемы. Строки, которые относятся к селектированным узлам/элементам, помечаются розовым цветом. Маркер  на панели управления выбором позволяет перейти в режим, при котором в таблицах отображаются только селектированные на схеме узлы/элементы. А с помощью маркера  устанавливается режим, позволяющий производить селекцию узлов/элементов на схеме, отмечая нужные строки в таблицах.

Информация в таблицах может быть отсортирована по тому или иному критерию, который выбирается из выпадающего списка, а кнопки  ,  позволяют выбрать режим сортировки по убыванию или по возрастанию критерия.

Кнопки  ,  позволяют получить содержимое таблиц в виде отчетного документа или электронной таблицы соответственно. Нажатие кнопки  приводит к тому, что в буфер обмена (clipboard) записывается список узлов/элементов, которые отображаются в таблице.

При подготовке данных двойной щелчок мыши на большинстве ячеек приводит к появлению диалогового окна, которое позволяет изменить данные для узла/элемента, соответствующего строке таблицы. Если такая модификация невозможна, то ячейка окрашена в серый цвет. При анализе результатов диалог тоже появится, но возможности изменить данные не будет (исключение составляет имя узла/элемента).

Первая страница **Фильтры отображения** фактически содержит информацию о настройках состояния фильтров отображения.

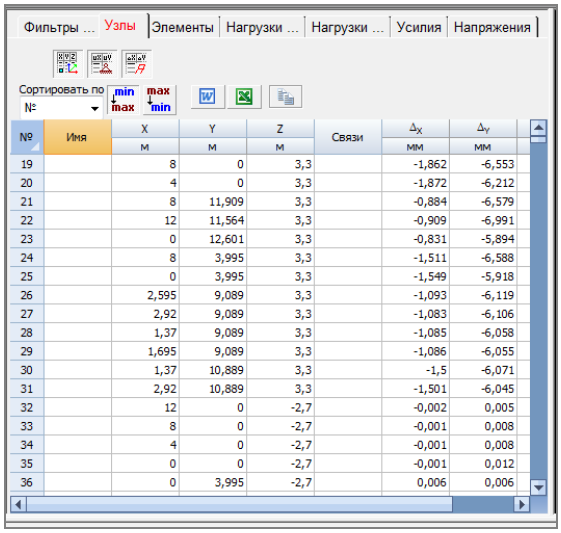



Рис. 4.1-11. *Страница* **Узлы**

Страница **Узлы** (рис. 4.1-11) содержит информацию об узлах расчетной схемы (имена узлов, координаты, связи). Маркеры   позволяют заказать или отказаться от отображения координат узлов и связей.

Если на схеме есть отмеченные узлы, то при подготовке данных нажатие кнопки  приводит к их удалению.

В режиме анализа результатов имеется возможность получить табличное представление следующей информации:

 — перемещения узлов;

 — реакции в связях.

Для динамических загружений:

 — веса масс;

 — ускорения узлов;

 — динамические нагрузки.

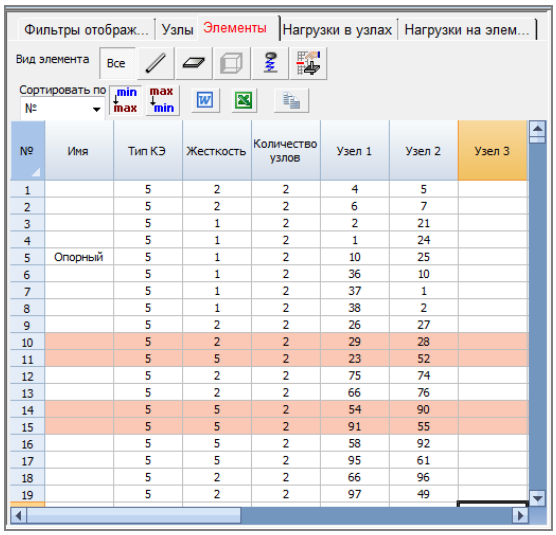



Рис. 4.1-12. *Страница* **Элементы**

Страница **Элементы** (рис. 4.1-12) содержит информацию об элементах расчетной схемы (имя, тип конечного элемента, номер типа жесткости, ...).

В верхней части таблицы имеются фильтры, предназначенные для того, чтобы отказаться от отображения в таблице конечных элементов определенного типа (стержни, пластины, ...), а также кнопка  для удаления выбранных элементов.

Страницы **Нагрузки в узлах** (рис. 4.1-13), **Нагрузки на элементы** (рис. 4.1-14) и **Нагрузки на области** содержат данные о нагрузках текущего загружения. Расположенные в верхней части фильтры позволяют произвести фильтрацию данных в таблице. Например, для узлов — выводить только нагрузки типа *смещение связи*, а в выпадающем списке **Направления** заказать вывод только по оси Z. Аналогично, для элементов может быть произведена фильтрация по типам элементов, видам нагрузки, системе координат (местная или общая) и т. п.

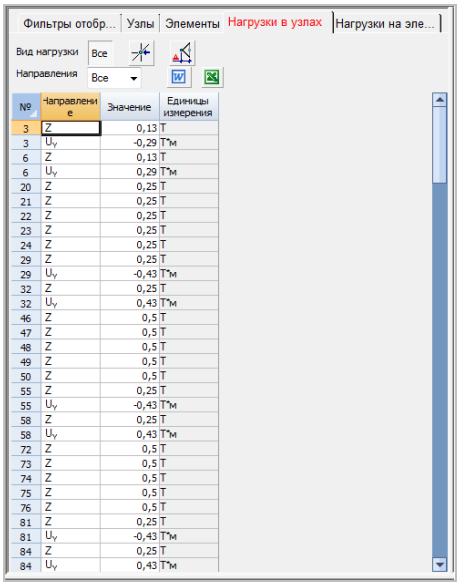



Рис. 4.1-13. *Страница* **Нагрузки в узлах**

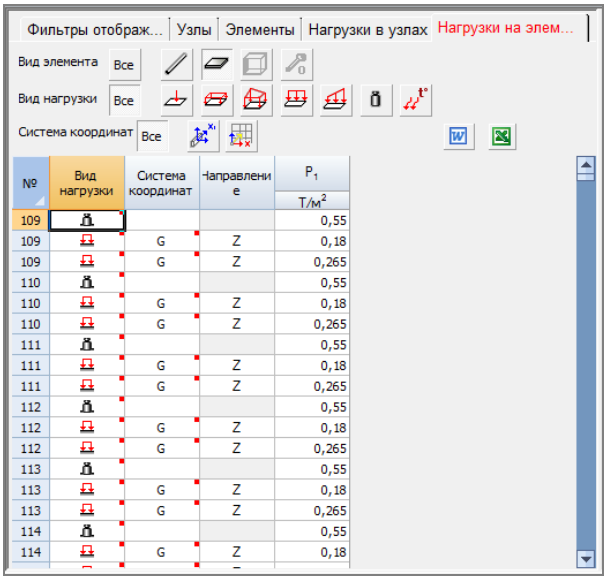



Рис. 4.1-14. *Страница* **Нагрузки на элементы**

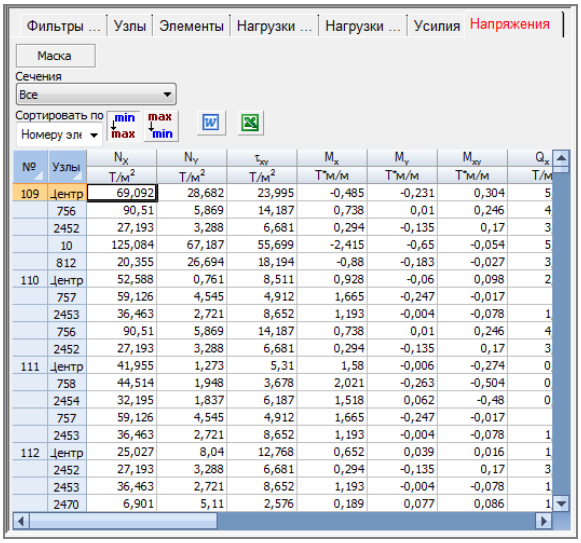



Рис. 4.1-15. *Страница* **Напряжения**

При анализе результатов появляются страницы **Усилия**, **Напряжения**, **Усилия в специальных элементах** (рис. 4.1-15), в которых выводятся данные об усилиях в стержнях, напряжения в пластинах и объемных элементах, усилия в специальных конечных элементах. Кнопка **Маска** вызывает диалоговое окно (рис. 4.1-16), в котором можно установить виды усилий/напряжений, которые следует отображать в таблице.

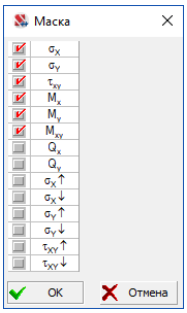



Рис. 4.1-16. *Диалоговое окно* **Маска**

Поскольку загрузка данных об усилиях/напряжениях — процедура относительно длительная, табличное представление информации на страницах **Усилия** и **Напряжения** производится только после того, как пользователь заказал графические отображение эпюр или изополей.

## Список сообщений

При внесении каких либо изменений в расчетную схему сообщения об этих изменениях заносятся в специальный протокол (журнал), который расположен в нижней части окна с отображением расчетной схемы (рис. 4.1-17).

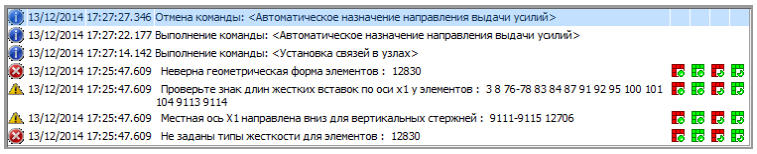



Рис. 4.1-17. *Список сообщений*

Данный список можно очистить, используя кнопку  , расположенную в инструментальной панели **Управление**.

Кроме того, в протокол попадают сообщения об ошибках, которые обнаружены, например, при контроле расчетной схемы. Во многих случаях строки этих сообщений содержат кнопки, которые позволяют выполнить следующие действия:

 — отобразить всю расчетную схему и селектировать элементы/узлы, к которым относится сообщение;

 — отобразить всю расчетную схему и отметить элементы/узлы, к которым относится сообщение, для дальнейшей фрагментации;

 — селектировать элементы/узлы из активного фрагмента, к которым относится сообщение;

 — отметить элементы/узлы из активного фрагмента, к которым относится сообщение, для дальнейшей фрагментации.

Если курсор расположен в поле журнала и нажата правая кнопка мыши, то появляется меню (рис. 4.1-18), первые две позиции которого позволяют сохранить в буфере (**Clipboard**) выбранную строку — команда **Копировать строку**, если какая-либо из строк в журнале была предварительно селектирована, или все строки сообщений — команда **Копировать все строки**. Кроме того, в меню продублированы кнопки для селекции указанных в журнале объектов.

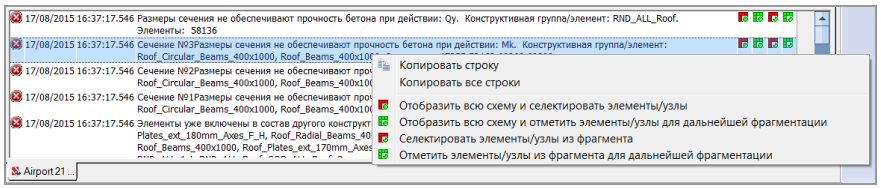



Рис. 4.1-18. *Меню журнала*

## 4.2. Отмена и повтор операций

В разделе меню ***Операции*** (рис. 4.2-1) предусмотрена возможность возврата к предыдущему состоянию расчетной схемы, т. е. отмены результатов работы ранее выполненных операций (пункт **Отменить**) или восстановления результатов выполнения операций после их отмены (пункт **Повторить**). Команда **Повторить** доступна только после вызова команды отмены.

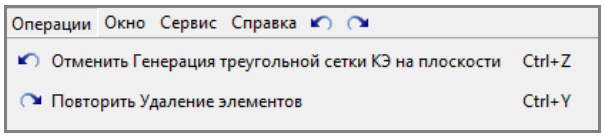



Рис. 4.2-1. *Отмена и повтор операций*

Информация в меню включает имя последней выполненной операций. Отмена операции или повтор могут быть выполнены также с помощью комбинаций клавиш **Ctrl+Z** и **Ctrl+Y** соответственно. Кроме того, кнопки для выполнения отмены  и повтора  есть также в основном меню.

## 4.3. Цветовые шкалы

Всякий раз, когда возникает необходимость оценить общую картину распределения того или иного фактора на конструкции или ее фрагменте, можно использовать цветовое представление исходных данных и результатов расчета.

Это относится, например, к цветовой маркировке типов жесткостей или значений перемещений в узлах, к изополям напряжений в пластинах или к суммарным нагрузкам в узлах.

В зависимости от характера данных, представленных в цвете, шкалы могут иметь конечное количество цветов, например, в шкале типов жесткостей их будет ровно столько, сколько задано типов жесткости. Если речь идет о результатах расчета, то в большинстве случаев пользователь сам определяет количество интервалов (цветов) представления фактора. Такие шкалы можно назвать ***интервальными***.

Цветовые шкалы представлены в виде диалоговых окон, каждое из которых содержит таблицу с параметрами фактора и элементы управления шкалой. Кроме того, диалоговые окна шкалы содержат информацию о количестве объектов (узлов или элементов), которые обладают свойством соответствующим строке таблицы, и представление количества в виде гистограммы (рис. 4.3-1).

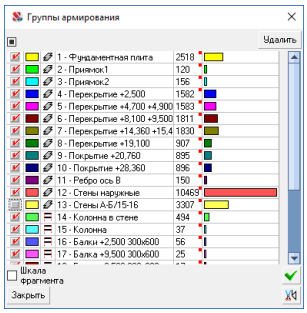



Рис. 4.3-1. *Диалоговое окно цветовой шкалы*

Элементы управления цветовой шкалой позволяют управлять отображением в зависимости от характера информации. Каждому интервалу результатов или параметру модели (например, типу жесткости или значению коэффициента постели) соответствует маркер  и цветовое поле. Если маркер включен, то на схеме цветом будут отображены результаты (изополя, изолинии и т. п.), входящие в соответствующий интервал или объекты, обладающие соответствующими характеристиками. Отключив маркеры, можно отказаться от цветового отображения, например, части результатов, имеющих несущественные для работы конструкции значения анализируемого фактора.

Можно уменьшить или увеличить число интервалов и сделать их неравномерными. Для того чтобы отобразить на схеме сделанные таким образом установки, используется кнопка  — **Применить**, расположенная в нижней части окна со шкалой. Предусмотрена возможность одновременно включить или отключить все интервалы. Для этого используется маркер, стоящий слева над таблицей цветовой шкалы.

Нажатие правой клавиши мыши в таблице вызывает меню, которое также позволяет выполнить операции установки или сброса всех отметок, инвертирования отметок, селекции узлов и/или элементов.

### Управление интервальными цветовыми шкалами

Набор элементов управления интервальными цветовыми шкалами зависит от вида и формы представления исследуемого фактора в шкале. Различаются шкалы следующих видов:

- равномерные шкалы силовых факторов, перемещений, коэффициентов использования ограничений и др. с автоматически настраиваемыми значениями интервалов (задается количество интервалов);
- шкалы силовых факторов, перемещений, коэффициентов использования ограничений и др. с заданным значением шага интервалов (постоянным шагом);
- равномерные шкалы, с заданной величиной «переходной зоны».

Выбор вида шкалы выполняется в инструментальной панели исследуемого фактора, а форма представления — непосредственно в окне цветовой шкалы. Для этого в верхней зоне окна расположены четыре кнопки управления (за исключением шкалы, с заданной величиной «переходной зоны», где используется только одна кнопка):

 — задание значения фактора $f$, разделяющего шкалу на две независимые части $f_{min} \div f$ и $f \div f_{max}$, каждая из которых разбивается на соответствующее количество равных интервалов;

 — равномерное заполнение цветом заданного интервала шкалы;

 — переключение формы представления значений фактора в таблице цветовой шкалы (в один или два столбца);

 — выбор палитры цветовой шкалы и управление шкалой.

Для разделения шкалы на две части следует нажать кнопку  и в появившемся диалоговом окне ввести значение фактора, делящее шкалу. После выхода из окна нажатием кнопки **OK** шкала будет перестроена в соответствии со сделанными назначениями.

Равномерное заполнение цветом заданного интервала шкалы означает, что в интервале значений фактора $f_i \div f_n$ цвета в шкале будут плавно меняться от цвета, назначенного для $f_i$, до цвета, соответствующего $f_n$. Для выполнения этой операции следует:

- отключить маркеры активности всех интервалов цветовой шкалы за исключением двух маркеров, соответствующих интервалам $f_i$ и $f_n$;
- назначить цвет одному из интервалов, для чего:
  - установить курсор на цветовое поле выбранного интервала и дважды нажать левую кнопку мыши;
  - в появившемся стандартном диалоговом окне **Цвета** выбрать цвет для этого интервала;
  - повторить эти же действия для второго интервала;
- нажать кнопку  .

В программе реализованы три фиксированные цветовые шкалы: «горячая» — красно-желто-синяя шкала, «холодная» — сине-желто-зеленая шкала и «серая» — в оттенках серого цвета. Переключение шкал выполняется в выпадающем меню, которое появляется после нажатия кнопки  — **Выбор палитры**.




Пользователь имеет возможность подготовить собственные цветовые палитры шкал. Для этого необходимо:

- назначить цвета интервалам одной из шкал;
- нажать кнопку  — **Выбор палитры** в этой цветовой шкале;
- в выпадающем меню выбрать операцию **Сохранить палитру**, после чего появляется одноименное диалоговое окно, в котором задается имя палитры.

После записи новой палитры ею можно пользоваться не только в текущей задаче, но и при работе с другими моделями.

При выборе пункта меню **Управление шкалой** … появляется диалоговое окно (рис. 4.3-2), в котором содержится список сохраненных шкал, и можно выполнить следующие операции:

- **загрузить** ранее сохраненную шкалу;
- **удалить** выбранную в списке шкалу;
- **сохранить** текущую шкалу с именем, заданным в этом диалоге;
- **заменить** выбранную в списке шкалу текущей шкалой;
- импортировать... шкалы, ранее сохраненные для другой модели (при этом появится стандартный Windows-диалог для выбора нужного SCADModelIntervals-файла).

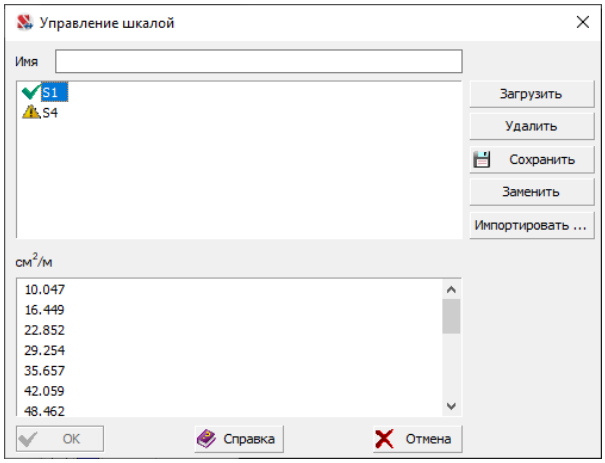



Рис. 4.3-2. *Диалоговое окно* **Управление шкалой**

При выборе шкалы в списке в нижней части диалогового окна появляется список значений интервалов шкалы. Шкалы сохраняются в файле с расширением .SCADModelIntervals и именем, которое соответствует имени файла с проектом. Если сохраненная шкала полностью соответствует типу ранее сохраненной шкалы (например, в случае шкал интенсивности продольной арматуры в пластинах — соответствует тому же типу – $S_1$,$S_2$,…), то в списке сохраненных шкал она будет помечена иконой ✔. В противном случае появится икона ⚠. Такие шкалы также можно загрузить и использовать, но ответственность за такую операцию лежит на пользователе.

### Выбор количества интервалов

При работе с интервальными шкалами можно менять количество интервалов цветового представления фактора. Для этого следует выбрать из списка 16 — **Выбор количества интервалов** нужное значение. Количество интервалов может быть любым в интервале от двух до шестнадцати, а также двадцать четыре, тридцать два, сорок восемь или шестьдесят четыре.

### Настройка значений интервалов

При вызове цветового отображения результатов расчета в виде интервальной шкалы выполняется автоматическое разбиение всего диапазона значений фактора на установленное в текущий момент времени количество равных интервалов. В тех случаях, когда предпочтительной для анализа является неравномерная разбивка, предусмотрена возможность внести изменения в шкалу путем настройки значений границ отдельных интервалов. Для этого используется кнопка — **Настройки цветовой шкалы**, нажатие которой приводит к появлению диалогового окна **Настройки**. Изменение значений границ интервалов выполняется в таблице, заполнение которой соответствует состоянию цветовой шкалы.

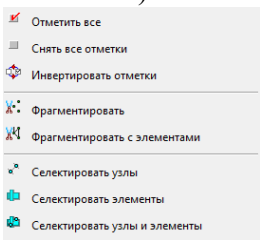
Кроме того, в этом окне находится кнопка **Инвертировать**, нажатие которой приводит к смене цветов интервалов в шкале. При этом порядок следования цветов меняется на обратный (например, если в шкале изменялся цвет интервалов от синего — для минимального значения до красного — для максимального, то после выполнения инвертирования, цвета будут меняться от красного к

синему). Изменения в цветовой шкале будут выполнены после выхода из диалогового окна нажатием кнопки **ОК**.

### Фрагментация схемы

Схема может быть фрагментирована таким образом, что на экране останутся только те объекты, в которых значения исследуемого фактора будут лежать в диапазоне значений активных (с включенными маркерами) интервалов. Для этого следует оставить активными в цветовой шкале только интересующие интервалы и нажать кнопку  — **Фрагментировать**, которая расположена в правом нижнем углу окна цветовой шкалы.

Используя кнопку  или правую кнопку мыши в области таблицы со шкалой можно активировать контекстное меню с дополнительными возможностями (инвертация выбранных интервалов, селекция/фрагментация узлов/элементов):




### Управление диапазоном значений фактора в цветовой шкале

Если в текущем окне отображается не вся схема, а только ее часть (выполнена фрагментация расчетной схемы), то значения анализируемого фактора могут отображаться в цветовой шкале без учета фрагментации, т. е. в диапазоне изменения значений фактора во всей схеме, или только в диапазоне этого фрагмента. Для переключения шкалы используется маркер **Шкала фрагмента**.

Для завершения работы с цветовой шкалой используется кнопка Закрыть.

### Шкала с постоянным шагом интервалов



В отличие от шкал с автоматическим выбором шага (в зависимости от количества интервалов), в шкалах с постоянным шагом количество интервалов будет зависеть от назначенного шага. Правило формирования интервалов для данного вида шкал следующее:

- находится ближайшее к минимуму значение фактора $f_{min}$, кратное заданному шагу;
- весь диапазон значений фактора, начиная от $f_{min}$, и до значения $f_{max}$, (ближайшее к максимальному значению фактора число меньшее максимума и кратное шагу) разбивается на равные интервалы;
- первым и последним значениями интервала в цветовой шкале будут значения от минимального значения фактора до $f_{min}$ и от $f_{max}$ до максимального значения фактора.

Значение шага задается в диалоговом окне **Настройки**, которое вызывается нажатием кнопки **Настройки цветовой шкалы** —  .



**Если та или иная шкала была изменена (настроена), то эти настройки сохраняются в файле с расширением .SCADModelColor в каталоге расчетной схемы. Этот файл с настройками уничтожается при изменении расчетной модели. Если нужно перенести на другой компьютер исходные данные, результаты расчета и настройки цветовых шкал, то следует не забывать о копировании файлов типа SCADModelColor.**

### *Шкалы с заданной величиной «переходной зоны»*



Характерной особенностью такой шкалы является наличие зоны, условно называемой «переходной» (хотя не исключено, что только этот диапазон значений фактора и будет по какой-то причине интересовать пользователя). Количество интервалов в такой шкале всегда нечетное, их минимальное количество — три, а максимальное — пятнадцать. Настройка зоны выполняется в диалоговом окне **Настройки**, которое вызывается нажатием кнопки **Настройки цветовой шкалы** —  . В этом окне задается значение фактора — $f$, вокруг которого образовывается переходная зона и величина, характеризующая размер зоны $\Delta f$ . Интервал значений фактора, попадающий в зону, лежит от $f - \Delta f$ до $f + \Delta f$. Интервалы, лежащие вне переходной зоны, разбиваются на равные части в зависимости от заданного количества интервалов.

В верхней части окна цветовой шкалы расположена только одна кнопка настройки  — для переключения формы представления значений фактора в таблице цветовой шкалы (в один или два столбца).

## 4.4. Решение простейшей задачи

Поскольку, как отмечалось выше, принципы управления комплексом **SCAD** мало чем отличаются от принципов, принятых для большинства приложений, реализованных в операционной среде Windows, приведенных общих сведений достаточно, чтобы попробовать решить простейшую задачу. Для этого необходимо выполнить следующие действия:

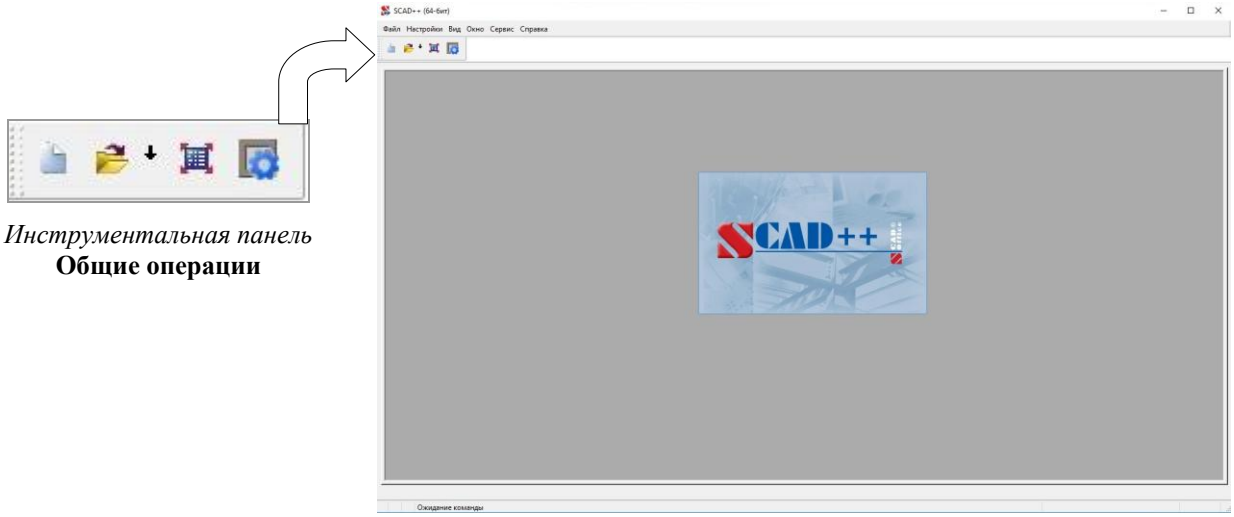
- загрузить вычислительный комплекс;
- создать новый проект;
- сформировать расчетную схему;
- выполнить расчет;
- провести анализ результатов расчета.

### Загрузка комплекса



Для того чтобы начать работу с комплексом, необходимо установить курсор на пиктограмму **SCAD++** и дважды нажать **левую** кнопку мыши. На фоне окна инициализации появится изображение заставки (рис. 4.4-1). Загрузка комплекса продолжается несколько секунд. В течение этого времени на экране установлен курсор «ожидания» в виде песочных часов (если, конечно, на вашем компьютере он не заменен на более экзотический). Об окончании загрузки сигнализирует смена курсора ожидания на рабочий курсор — стрелку.

Окно инициализации включает меню и инструментальную панель **Общие операции**. Инструментальная панель содержит пять кнопок. Две первые кнопки дублируют аналогичные функции раздела меню ***Файл,*** позволяя выполнить соответствующие операции более коротким путем.




*Инструментальная панель*
**Общие операции**

Рис. 4.4-1. *Окно инициализации* **Structure CAD**

 — Создание нового проекта;

 — Открыть проект;

 — Переход в полноэкранный режим работы позволяет увеличить размеры рабочего окна по вертикали за счет строки заголовка и панели задач. Повторное нажатие кнопки — возвращает окну исходный размер;

 — кнопкой **Настройки** вызывается одноименное диалоговое окно, в котором задаются параметры настройки комплекса (единицы измерения, шрифты, каталоги металлопроката и др.), принятые для решаемой задачи.



***Если одна или несколько кнопок окрашены в серые тона, то это означает, что соответствующая операция или опция в данный момент не доступны.***

## Создание нового проекта



Для создания нового проекта установите курсор на одноименную кнопку инструментальной панели и нажмите левую кнопку мыши. На экране появляется диалоговое окно **Новый проект** (рис. 4.4-2), в котором задается информация о проекте (наименование, организация, объект), выбирается вид расчетной схемы (стандартная, расчетная схема режима вариации моделей, монтаж или схема из укрупненных элементов, формируемая в препроцессоре **ФОРУМ**).

Кнопками **Единицы измерения** и **Нормы проектирования** вызываются одноименные диалоговые окна, которые позволяют выполнить настройки соответствующих параметров. По умолчанию принято, что размеры расчетной схемы задаются в метрах, размеры сечений в сантиметрах, а силы в тоннах. Договоримся, что при формировании расчетной схемы простейшей задачи эти настройки меняться не будут, как и установленные по умолчанию нормы проектирования. Описание соответствующих диалоговых окон будет приведено ниже.

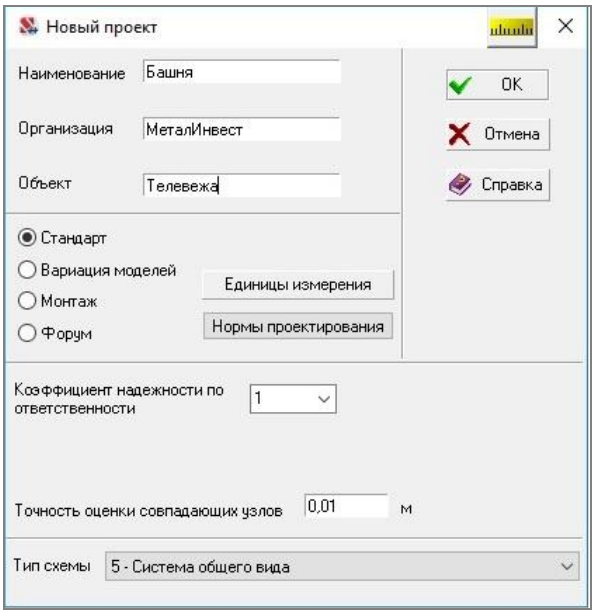



Рис. 4.4-2. *Диалоговое окно* **Новый проект**

Поскольку коэффициенты надежности по ответственности зависят от норм проектирования, то их значения выбираются из одноименного списка после указания норм проектирования (при использовании ДБН В.1.2-14-2009 — коэффициентов два, — отдельно для первого и второго предельных состояний). Заданные при создании проекта коэффициенты надежности по ответственности будут использованы как значения по умолчанию при создании групп конструктивных элементов (см. главы 19, 20).

Тип расчетной схемы выбирается из списка и определяет состав и максимальное количество степеней свободы в узлах схемы, а также характеризует особенности ее напряженно-деформированного состояния. Назначаемый тип схемы должен включать все необходимые степени свободы для используемых в схеме конечных элементов. По умолчанию устанавливается **тип 5** — система общего вида, в которой каждый узел имеет шесть степеней свободы: линейные перемещения X, Y, Z и углы поворота $U_X$, $U_Y$, $U_Z$.

Кроме того, в этом окне задается параметр, определяющий точность оценки совпадающих узлов (максимальное расстояние между узлами, при котором узлы считаются совпадающими).

Практически все параметры, задаваемые в этом окне, могут быть изменены по ходу формирования расчетной схемы.

Диалоговое окно **Новый проект**, как и большинство других диалоговых окон, включает три командные кнопки: **OK**, **Отмена** и **Справка**.

**OK** — закрывает диалоговое окно с автоматическим сохранением всей введенной информации.

**Отмена** — закрывает окно без сохранения введенной информации.

**Справка** — открывает доступ к справочной информации.

Таким образом, окно **Новый проект** используется для настройки комплекса перед началом работы над проектом.

После нажатия кнопки **OK** диалоговое окно закроется и на экране появится стандартное окно **Сохранить как**, в котором необходимо задать имя файла нового проекта (назовем файл простейшей задачи, например, Project 1). Это имя будет присвоено собственно файлу проекта, а также всем служебным файлам и файлам с результатами расчета. Файл с расширением **.SPR** автоматически будет помещен в директорию, назначенную при инсталляции комплекса для хранения исходных данных.

После создания файла проекта управление передается **Дереву проекта** (рис. 4.4-3), которое содержит три раздела первого уровня, являющиеся фактически этапами решения задачи: **Исходные данные**, **Расчет** и **Результаты.**

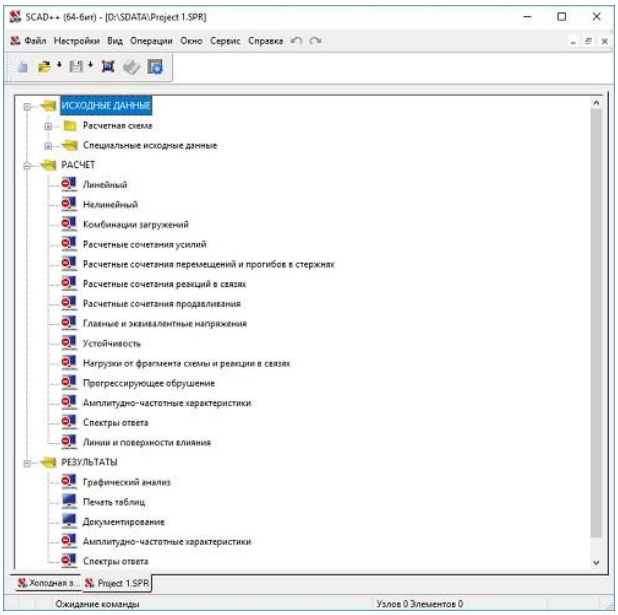



Рис. 4.4-3. **Дерево проекта**

Эти разделы содержат ссылки на разделы второго уровня, которые детализируют выполняемые операции, например, **Расчетная схема**, **Линейный расчет** или **Печать таблиц**.

Разделы **Расчетная схема** и **Специальные исходные данные** включают подразделы с перечнем исходных данных.

**Дерево проекта** отображает состояние проекта, т. е. наличие или отсутствие в проекте соответствующего вида данных, а также доступность функций, например, расчета или анализа результатов. Из **Дерева** выполняется инициализация всех функций — ввод данных, расчет или графический анализ результатов. Для этого достаточно установить курсор на **наименование** соответствующей ветви и нажать левую кнопку мыши. Кроме того, **Дерево проекта** иллюстрирует структуру комплекса.

## Раздел «Управление» инструментальной панели препроцессора

Работу по созданию нового проекта начинают с формирования расчетной схемы. Для этого следует установить курсор на раздел **Расчетная схема** в **Дереве проекта** и нажать левую кнопку мыши. Управление будет передано графическому препроцессору, в котором и выполняется формирование расчетной схемы. Инструментальная панель препроцессора содержит различные операции создания геометрии схемы, назначения граничных условий, нагрузок и др. После старта препроцессора в инструментальной панели активен раздел **Управление** (рис. 4.4-4).

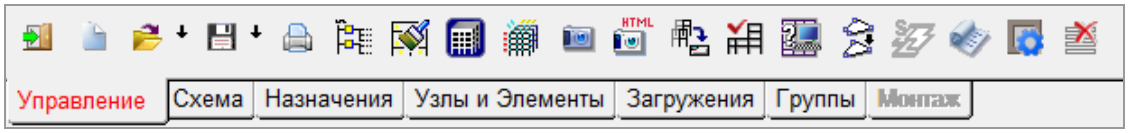



Рис. 4.4-4. *Раздел* **Управление** *инструментальной панели препроцессора*

 — **Выход** — завершение работы с программой;

 — **Новый проект** — создание нового проекта;

 — **Открыть проект** — загрузка ранее созданного проекта;

 — **Сохранить** — запись текущего проекта без изменения имени;

 — **Печать** — вывод на принтер видимого на экране изображения схемы;

 — **Выйти в экран управления проектом** — передача управления **Дереву проекта**;

 — **Упаковка данных** — удаленные узлы и элементы исключаются из проекта, а оставшиеся перенумеровываются; используется в тех случаях, когда работа по созданию схемы закончена, и нет необходимости сохранять информацию об удаленных узлах и элементах;

 — **Показать/скрыть панель визуализации** — скрыть или вернуть на экран панель **Визуализация**;

 — **Показать/скрыть панель фильтров** — скрыть или вернуть на экран панель **Фильтры отображения**;

 — **Сохранение образа экрана** — текущее отображение схемы сохраняется в формате Windows метафайла (в файле с расширением **.emf** или **.wmf**) или растровом формате (**.bmp**, **.png**, ...) и может использоваться, например, при подготовке отчета;

 — **Сохранение текущего отображения расчетной схемы в формате HTML** — текущее отображение схемы сохраняется в формате HTML и может использоваться, например, для размещения в Интернете;

 — **Сохранение фрагмента схемы** — видимый на экране фрагмент расчетной схемы сохраняется в виде самостоятельного проекта;

 — **Экспресс-контроль схемы** — осуществляет формальный контроль расчетной схемы в процессе подготовки исходных данных;

 — **Проверка готовности к расчету** — выполняется расширенный контроль расчетной схемы, проверяется готовность схемы для выполнения расчета;

 — **Корректировка элементов** — удаляются или заменяются некорректные (с точки зрения формы) конечные элементы;

 — **Определение площади, периметра и углов полигонов** — определяется площадь, периметр и углы полигона, заданного на плоском фрагменте расчетной схемы;

 — **Просмотр протокола решения задачи** — протокол решения задачи выводится в указанном в настройках текстовом редакторе;

 — **Настройки** — задаются параметры настройки комплекса (единицы измерения, шрифты, каталоги металлопроката и др.), принятые для решаемой задачи;

 — **Очистка списка сообщений** — очистка журнала с сообщениями о ходе формирования и решения текущей задачи.

## Формирование расчетной схемы, расчет и анализ результатов

В этом разделе приводится «экспресс-описание» операций формирования расчетной схемы. После выполнения шаг за шагом описанных ниже действий будет создана простейшая схема. Здесь не рассматриваются операции, связанные с ее модификацией, т.к. основная цель — освоение основных принципов управления комплексом.

Операции формирования расчетной схемы и анализа результатов расчета реализованы в единой графической среде. Расположение элементов управления и, собственно, управление комплексом в этих режимах одинаково. Различается только набор функций.

### *Ввод параметров расчетной схемы*

В качестве учебной схемы используем пример, приведенный на рис. 4.4-5 — рама, с тремя пролетами и двумя этажами. Для создания расчетной схемы такого объекта можно воспользоваться стандартной операцией **Генерация прототипа рамы** —  . Эта операция, как и большинство

других операций формирования расчетных моделей на основе параметрических прототипов, вызывается из раздела **Схема** инструментальной панели (рис. 4.4-6).

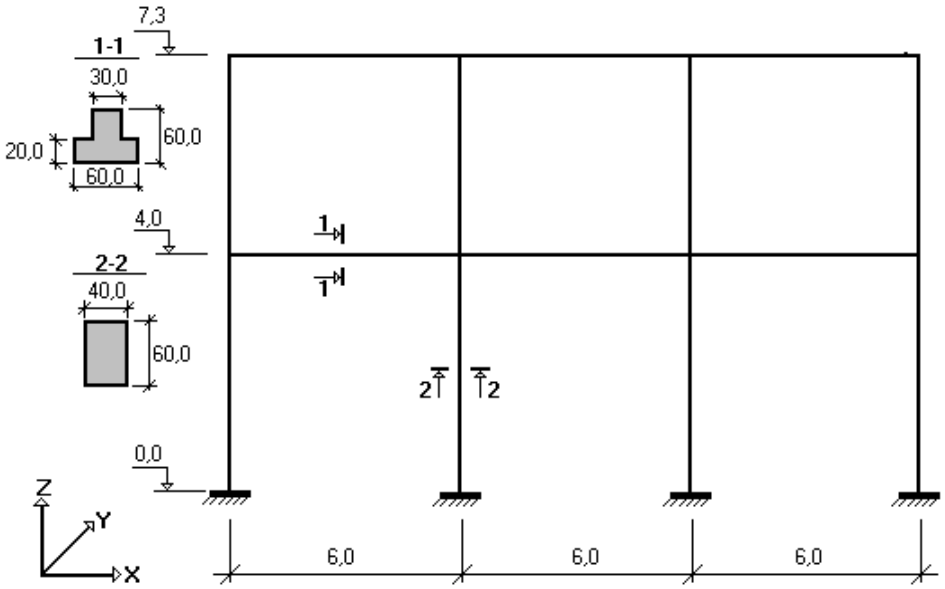



Рис. 4.4-5. *Расчетная схема*

В диалоговом окне **Выбор конфигурации рамы** (рис. 4.4-7) установим курсор на пиктограмму с изображением многоэтажной и многопролетной рамы и зафиксируем выбор нажатием на левую кнопку мыши. После нажатия кнопки **ОК** окно закроется и появится диалоговое окно **Задание параметров регулярной рамы** (рис. 4.4-8).

В этом окне выполняется ввод геометрических размеров рамы, назначаются жесткости элементов и накладываются связи в узлах. Для ввода размеров используются две таблицы: левая — для описания пролетов и правая — для описания этажей.




Рис. 4.4-6. *Инструментальная панель* **Схема**

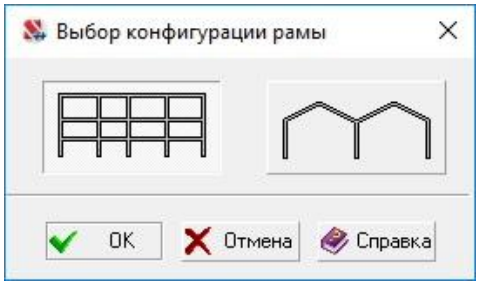



Рис. 4.4-7. *Диалоговое окно* **Выбор конфигурации рамы**

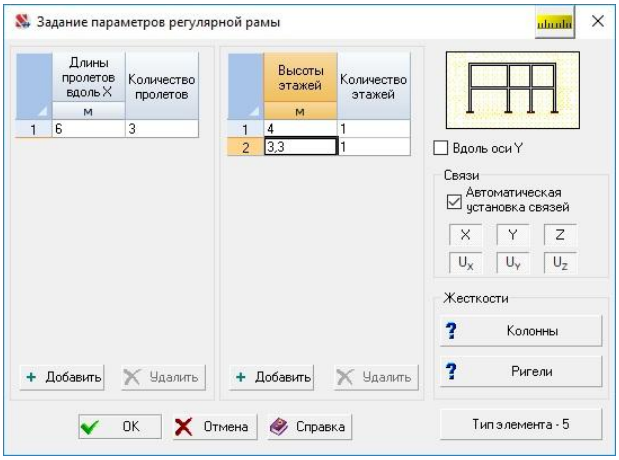



Рис. 4.4-8. *Диалоговое окно* **Задание параметров регулярной рамы**

Введем в таблицу описания пролетов — три пролета по 6 м, а в таблицу описания этажей — один этаж высотой 4 м и один — высотой 3.3 м.

Активация маркера **Автоматическая установка связей** означает, что в основании колонн сгенерированной рамы будут назначены связи по направлениям, соответствующим активным (нажатым) кнопкам-маркерам с наименованием степеней свободы. По умолчанию активируются маркеры, соответствующие степеням свободы установленного для задачи типа схемы.

Кнопки **Колонны** и **Ригели** служат для ввода жесткостных характеристик соответствующим элементам схемы, а кнопка **Тип элемента** — для назначения типов конечных элементов.

### *Ввод жесткостных характеристик элементов*

При задании параметров рамы предполагается, что введенные значения жесткостных характеристик колонн назначаются всем колоннам, а ригелей — всем ригелям.

Для ввода жесткостных характеристик колонн следует нажать кнопку **Колонны** и выполнить операции назначения в появившемся многостраничном диалоговом окне **Жесткость стержневых элементов** (рис. 4.4-9).

Принятые для рамы сечения элементов (рис. 4.4-5) относятся к так называемым параметрическим сечениям, и для их задания следует активировать одноименный маркер на первой странице (**Общие данные**) диалогового окна. Жесткостные характеристики параметрических сечений вычисляются автоматически в зависимости от материала, формы и размеров сечения. Эти данные задаются на странице **Параметрические сечения**, переход на которую выполняется указанием одноименной закладки (рис. 4.4-10).

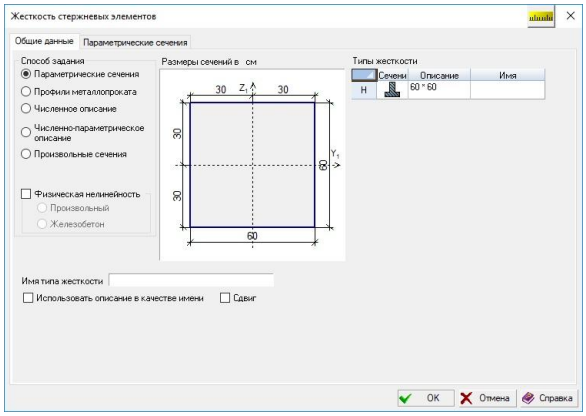



Рис. 4.4-9. *Диалоговое окно* **Жесткость стержневых элементов**

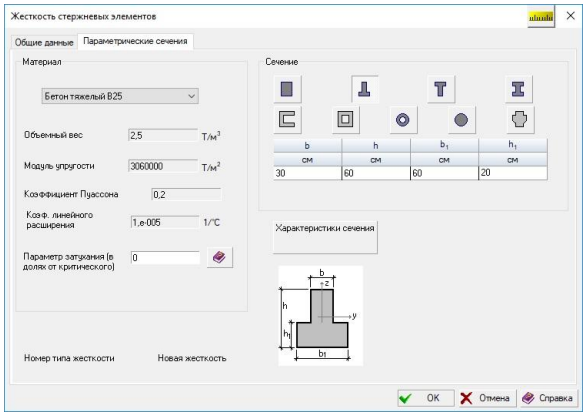



Рис. 4.4-10. *Страница* **Параметрические сечения**

Рекомендуется придерживаться следующего порядка работы:

- из списка **Материал** выбрать класс бетона, например, B25; при этом автоматически заполняются поля с характеристиками выбранного материала;
- нажать кнопку-маркер с изображением сечения колонны, в данном случае — прямоугольник;
- ввести размеры сечения в полях ввода;
- для контроля введенных данных можно воспользоваться кнопкой **Характеристики сечения**, нажатие которой приводит к появлению диалогового окна **Свойства сечения** с характеристиками сечения;
- если назначения корректны — нажать кнопку **ОК** окна **Жесткость стержневых элементов** (окно закрывается).

После выполнения последней операции управление вновь перейдет к диалоговому окну задания параметров рамы. Нажмем кнопку **Ригели** и выполним описанные выше действия для назначения жесткостных характеристик ригелей. Обратите внимание на рис. 4.4-5 — ригели, в отличие от колонн, имеют тавровое сечение.

### Генерация схемы

Поскольку все параметры рамы определены (типы конечных элементов назначаются автоматически, исходя из установленного типа схемы), то после нажатия кнопки **ОК** выполняется генерация расчетной схемы, изображение которой появляется в окне задачи (рис. 4.4-11).

Если воспользоваться фильтрами управления отображением (рис. 4-1), то непосредственно на расчетной схеме можно получить информацию о номерах узлов, элементов и типах жесткости.

Для этого следует активировать соответствующие кнопки на панели фильтров:

 — номера элементов;

 — связи;

 — номера узлов;

 — типы жесткости;

 — отображение узлов.

На рис. 4.4-11 приведена расчетная схема с отображением на ней меток узлов, их номеров, номеров конечных элементов, номеров типов жесткости и условным обозначением связей. Для того чтобы выполнить расчет, необходимо задать нагрузки.

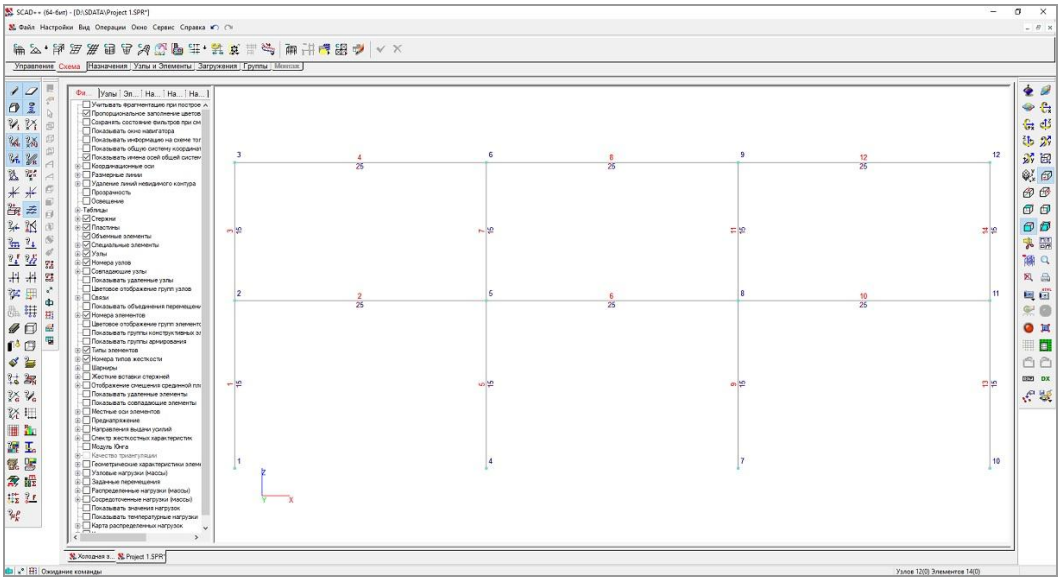


Рис. 4.4-11. *Расчетная схема рамы*

### Задание нагрузок

Операции задания нагрузок вызываются из раздела **Загружения** инструментальной панели (рис. 4.4-12).

Эти операции обеспечивают автоматическое формирование собственного веса конструкции, задание различного вида динамических и статических нагрузок на узлы и элементы схемы, сохранение назначенных нагрузок в виде схем загружений или групп нагрузок.

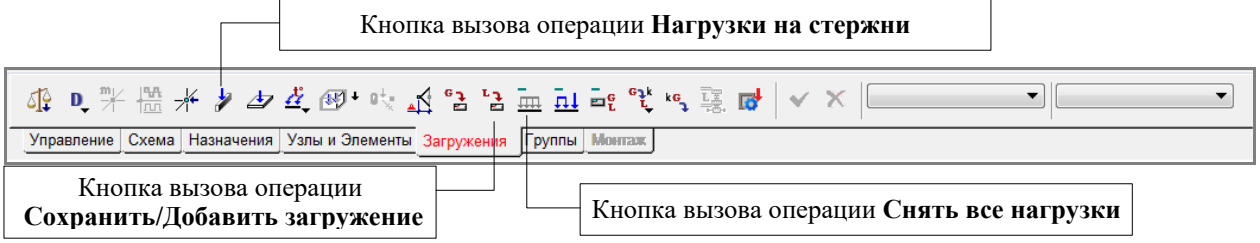



Рис. 4.4-12. *Раздел* **Загружения** *инструментальной панели препроцессора*

Зададим нагрузки на расчетную схему в виде двух загружений:

**Загружение 1 —** описывает постоянную нагрузку на перекрытиях и покрытиях и собственный вес колонн, первая из которых задается как равномерно распределенная нагрузка 4,36 Т/м на ригели, а вторая — на колонны — 0,66 Т/м. Нагрузки задаются по направлению оси Z общей системы координат;

**Загружение 2** — описывает временную нагрузку с пониженным нормативным значением на ригели. Задается аналогично **загружению 1**, но с другим значением нагрузки — 3,57.

***При выполнении расчета предполагается, что заданы расчетные значения нагрузок, т. е. нормативные значения умножены на коэффициент надежности по нагрузке. Таким образом, при назначении нагрузок на узлы и элементы схемы все нагрузки должны быть заранее приведены к их расчетным значениям.***

Для задания этих нагрузок воспользуемся следующими кнопками инструментальной панели:

 — Нагрузки на стержни;

 — Снять все нагрузки;

 — Сохранить/добавить загружение.

Для ввода нагрузок необходимо выполнить следующие операции:

- нажать кнопку задания нагрузок на стержневые элементы  и задать в открывшемся (рис. 4.4-13) диалоговом окне **Задание нагрузок на стержневые элементы** вид, направление и значение первой нагрузки;
- нажать кнопку **ОК** в диалоговом окне;
- с помощью одного из курсоров выбрать на схеме элементы, которым назначается нагрузка (отмеченные элементы будут окрашены в красный цвет);
- нажать кнопку  в инструментальной панели режима **Загружения** или клавишу **Enter** на клавиатуре;
- повторить описанные выше действия для второго вида нагрузки первого загружения.

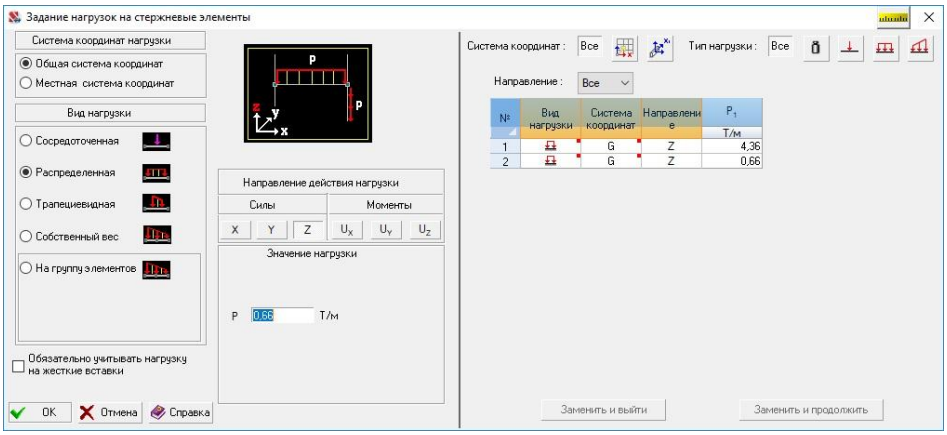



Рис. 4.4-13. *Диалоговое окно* **Задание нагрузок на стержневые элементы**

***Обратите, пожалуйста, внимание на перечисленные выше действия. Подавляющее большинство операций с узлами и элементами расчетной схемы выполняются именно в такой последовательности. Сокращенно эту последовательность можно записать так: выбрать операцию, задать параметры, выбрать объекты на схеме, нажать кнопку ОК в инструментальной панели, которой принадлежит выбранная операция, или клавишу Enter на клавиатуре.***

Если активировать фильтр отображения распределенных нагрузок  , то введенные нагрузки будут показаны на расчетной схеме. При включенном фильтре визуализации значений нагрузки  рядом с нагрузкой будет показано ее значение. Расчетная схема с отображением заданных нагрузок показана на рис. 4.4-14.

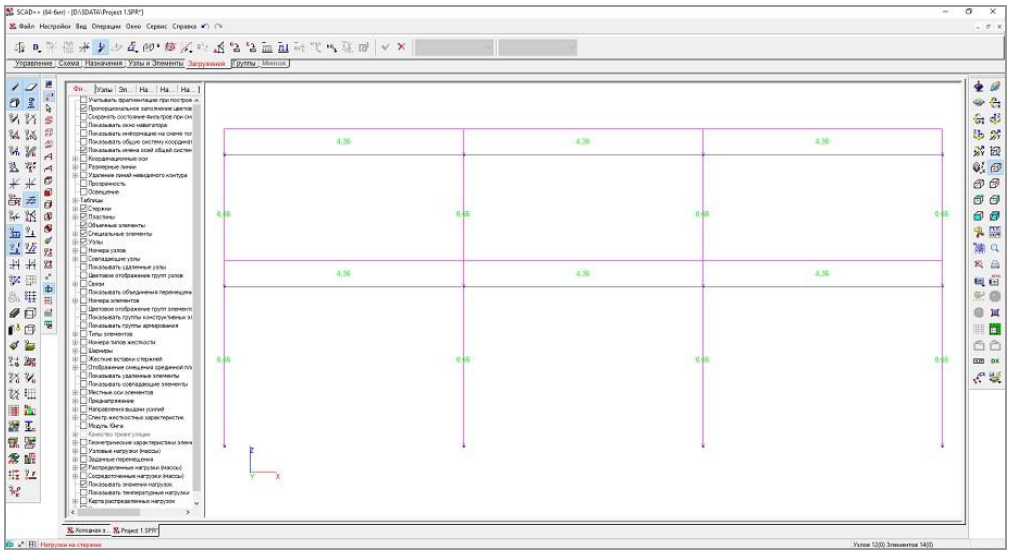


Рис. 4.4-14. *Расчетная схема с отображением нагрузок*

Для записи загружения следует нажать кнопку **Сохранить/добавить загружение** —  в инструментальной панели, после чего на экране появится диалоговое окно **Сохранение загружения** (рис. 4.4-15).

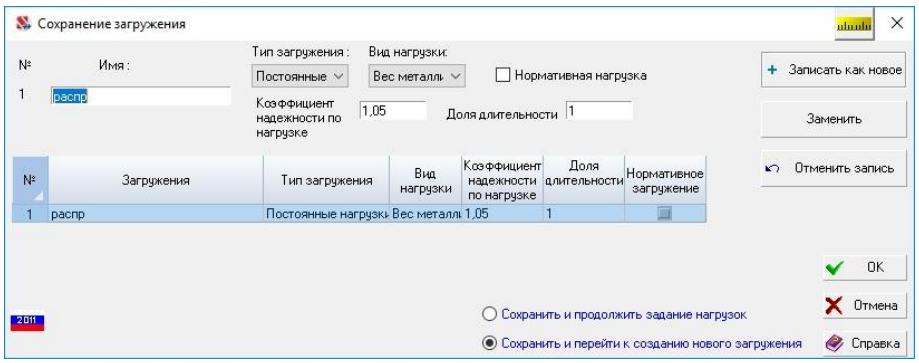



Рис. 4.4-15. *Диалоговое окно* **Сохранение загружения**

В этом диалоговом окне необходимо задать имя загружения, указать, выбрав из соответствующих списков, тип загружения и вид нагрузки, а также назначить коэффициент надежности по нагрузке. Указывается также, что заданные нагрузки нормативные или расчетные. После завершения ввода данных нажать кнопку **Записать как новое** и тем самым зафиксировать появление нового загружения. Информация о загружении попадет в таблицу загружений диалогового окна.

Номер присваивается загружению автоматически. Ввод имени загружения не является обязательным, но эта информация позволяет лучше ориентироваться при анализе исходных данных и результатов расчета. Что касается данных о типе загружения, виде нагрузки и коэффициенте надежности по нагрузке, то они будут использованы в качестве исходных данных расчетных сочетаний усилий (РСУ).



***Для завершения ввода текущего загружения его необходимо сохранить (записать в проект). В противном случае загружение не будет учтено при выполнении расчета.***

### *Ввод следующего загружения*

В тех случаях, когда после записи (сохранения) текущего загружения предполагается ввод нового загружения, необходимо «очистить» расчетную схему от заданных нагрузок. Это будет выполнено автоматически, если перед выходом из диалогового окна **Сохранение загружения** активировать опцию **Сохранить и перейти к созданию нового загружения**. Если по какой-либо причине этого не сделать, то после записи загружения в проект оно по-прежнему будет активным со всеми заданными в нем нагрузками.

Для того, чтобы в этой ситуации перейти к формированию нового загружения следует воспользоваться операцией **Снять все нагрузки** —  .

Создадим второе загружение, которое включает временную нагрузку с пониженным нормативным значением. Воспользуемся ранее приведенной последовательностью действий и зададим нагрузки на элементы расчетной схемы, после чего сохраним загружение, присвоив ему имя, тип и указав соответствующий вид нагрузки.

### *Сохранение и загрузка файлов проекта при работе с моделью*

Если в процессе работы со схемой возникнет необходимость сохранить на диске ее текущее состояние, то для этого следует воспользоваться операцией **Сохранить**. Если необходимо текущее состояние схемы записать под другим именем, то в этом случае используется операция **Сохранить проект как …**, доступная из раздела меню **Файл**. В последнем случае доступной для работы станет схема с новым именем.

При загрузке с диска расчетной схемы программа может выдать сообщение:

**"Документ изменен с тех пор, как он был последний раз сохранен. Чтобы вернуться к сохраненной версии, закройте текущий документ и откройте его заново".**

Это сообщение появляется в случае, когда пользователь в процессе модификации расчетной схемы делает попытку загрузить эту же схему с диска. При этом программа предлагает раньше сохранить на диске модифицированную схему, а затем выполнить ее загрузку. Если модифицированная схема по каким-либо причинам должна быть заменена схемой, хранящейся на диске, без сохранения текущего состояния модели, то активную схему необходимо закрыть с помощью операции **Закрыть проект** в разделе меню **Файл**, после чего выполнить загрузку схемы с диска.

## 4.5. Расчет

*Математика, подобно жернову, перемалывает лишь то, что под него засыпают*

Т. ГЕКСЛИ

Введенных данных достаточно, чтобы выполнить расчет сформированной расчетной схемы. Скорее всего, простейшая задача будет задана без ошибок. Но при подготовке более сложных расчетных моделей желательно до расчета выполнить контроль сформированной схемы. Для этого используются специальные операции в разделе **Управление** инструментальной панели препроцессора. Формальный контроль расчетной схемы в процессе подготовки исходных данных выполняется операцией **Экспресс-контроль схемы** (рис. 4.5-1) —  , для расширенного контроля аналогичного контролю, выполняемому в процессе расчета, используется операция **Проверка**

**готовности к расчету** (рис. 4.5-2) —  , а для контроля корректности формы и корректировки неудачных конечных элементов — операция **Корректировка элементов** (рис. 4.5-3) —  .

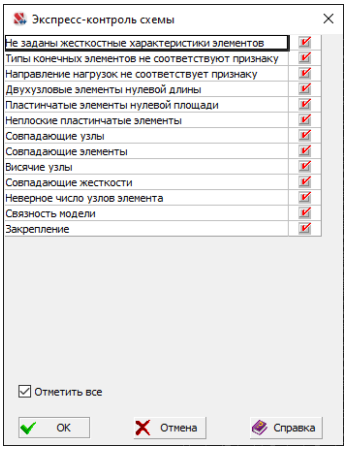



Рис. 4.5-1. *Диалоговое окно* **Экспресс-контроль схемы**

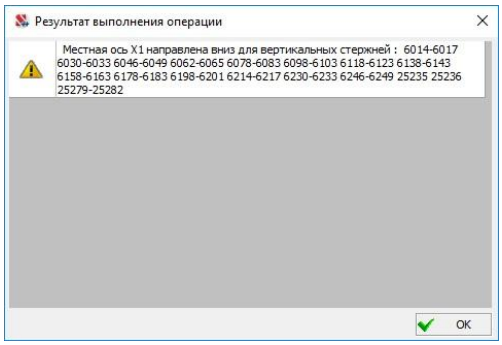



Рис. 4.5-2. Окно сообщений с результатами расширенного контроля

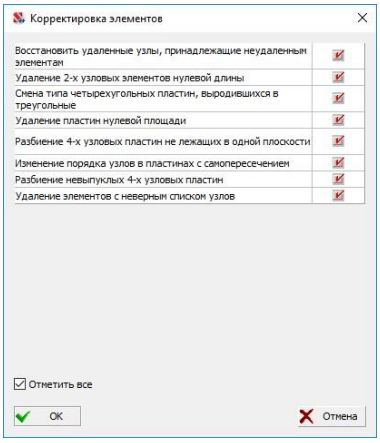
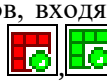



Рис. 4.5-3. *Диалоговое окно* **Корректировка элементов**

Перед выполнением операции экспресс-контроля необходимо в одноименном диалоговом окне с помощью маркеров отметить параметры расчетной модели, которые следует проверить. Перечень этих параметров достаточно очевиден. Вероятно, следует прокомментировать только понятие *связности модели*.

Модель считается связной, если для каждой пары элементов ($E_1$,$E_2$) можно найти такую последовательность элементов, которая начинается элементом $E_1$ и заканчивается элементом $E_2$ и в которой каждый последующий элемент имеет общий узел (или общие узлы) с предыдущим. Кроме того, при анализе связности учитывается объединение перемещений.

Если окажется, что модель несвязна, т.е. состоит из нескольких фрагментов, то в списке сообщений (см. рис. 4.1-17) выводится информация о номерах элементов, входящих в каждый из таких фрагментов. Используя кнопки управления списком сообщений —  , можно произвести селекцию или фрагментацию соответствующей части модели.

При включенной опции *Закрепление* дополнительно производится проверка того факта, что в расчетной модели есть закрепления (связи, упругие связи или упругое основание). Если модель несвязна, то проверка проводится для каждого связного фрагмента. Отсутствие закреплений означает геометрическую изменяемость системы (отметим, что наличие закреплений не гарантирует, что расчетная схема является геометрически неизменяемой).

Для выполнения расчета необходимо вернуться в **Дерево проекта**, для чего активируем закладку **Управление** в инструментальной панели и нажмем кнопку  — **Выйти на экран управления проектом (Дерево проекта)**.

Если позиция **Линейный** дерева проекта отмечена пиктограммой  , то это означает, что расчетная схема готова для выполнения расчета. Если пиктограмма имеет вид  , то расчет недоступен. Причиной этого, как правило, является полное или частичное отсутствие обязательных исходных данных. К ним относятся: нагрузки, жесткостные характеристики и, конечно, описание геометрии расчетной схемы. В тех случаях, когда отсутствуют необязательные данные (например, описание шарниров, которых в схеме может не быть), пиктограмма соответствующей ветви **Дерева проекта** в разделе **Расчетная схема** содержит вопросительный знак  .

В группе функций **Расчет** установим курсор в позицию **Линейный** и нажмем левую кнопку мыши (рис. 4.5-4). На экране появится диалоговое окно **Параметры расчета** (рис. 4.5-5), в котором выполняется настройка параметров управления расчетом. Подробное описание настроек приводится в последующих главах. Примем для расчета значения параметров, установленные по умолчанию, и нажмем кнопку **ОК**.

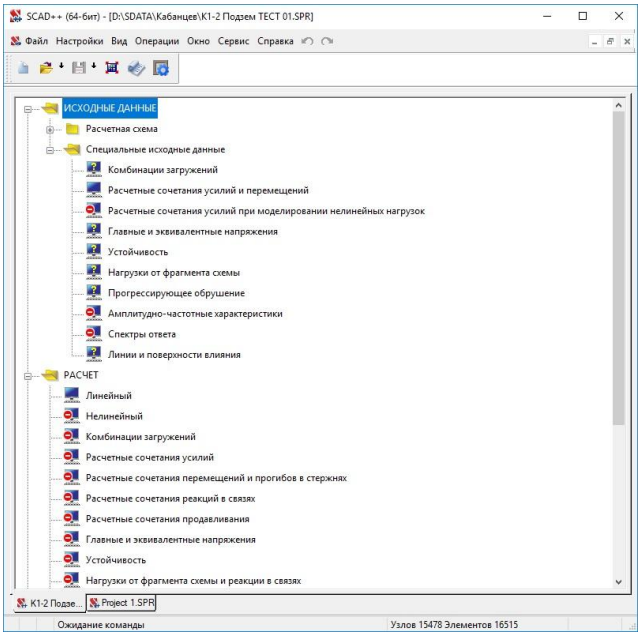



Рис. 4.5-4. *Дерево проекта*

Ход расчета отображается в специальном окне (рис. 4.5-6), в заглавии которого указано имя задачи. Окно состоит из трех полей, в первом из которых показана расчетная схема, во втором — профиль матрицы жесткости, а в третьем — протокол выполнения расчета. Если курсор мыши находится в первом поле (расчетная схема), то при нажатой левой клавише мыши пользователь может движением мыши производить вращение модели (двойной щелчок мыши вернет изображение в первоначальное состояние).

Кнопками в инструментальной панели этого окна вызываются следующие операции:

 — **Закрыть окно расчета** — прекращается выполнение текущего расчета;

 — **Приостановить расчет** — расчет приостанавливается;

 — **Продолжить расчет** — продолжение расчета после остановки.

Протокол выполнения расчета содержит всю информацию о ходе расчета, возникших при этом ошибках и предупреждениях, а также данные о расчетной схеме. Для просмотра протокола используется одноименная операция  , которая вызывается из инструментальной панели **Управление** пре- и постпроцессора или окна **Дерево проекта**.

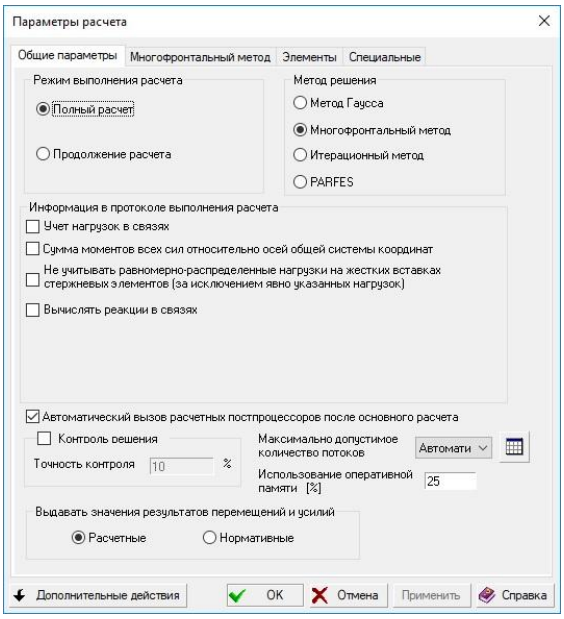



Рис. 4.5-5. *Диалоговое окно* **Параметры расчета**

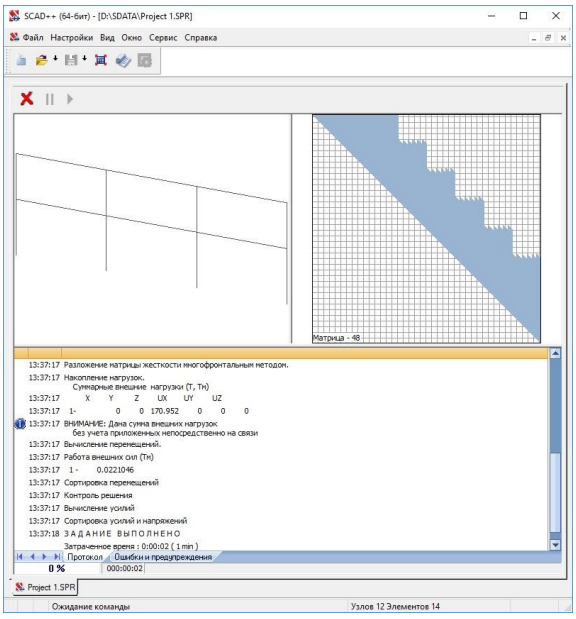



Рис. 4.5-6. *Окно отображения хода выполнения расчета*

## 4.6. Графический анализ результатов расчета

После завершения расчета и указания на кнопку **Закрыть окно расчета** управление передается дереву проекта. Если расчет завершился успешно, то можно приступить к анализу полученного решения.

Установим курсор в позицию **Графический анализ** раздела **Результаты** дерева проекта и нажмем левую кнопку мыши. При этом активируется окно графического постпроцессора (рис. 4.6-1), инструментальная панель которого содержит закладки панелей отображения результатов расчета (перемещения, усилия и напряжения), а также результатов работы расчетных и конструирующих постпроцессоров — закладки **Постпроцессоры** (анализ нагрузок от фрагмента схемы, главных и эквивалентных напряжений и т. п.), **Сталь** (экспертиза элементов стальных конструкций,), **Железобетон** (экспертиза элементов железобетонных конструкций).

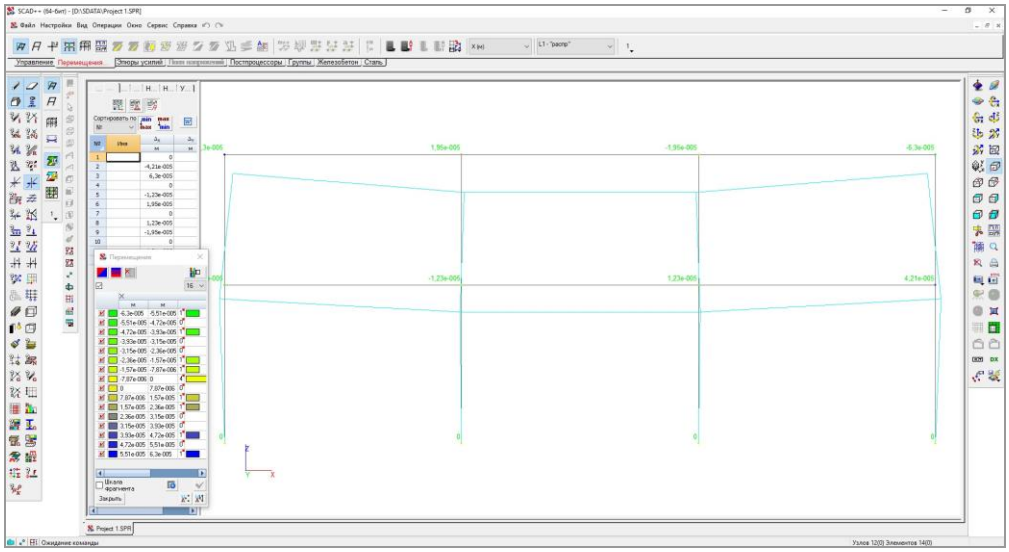


Рис. 4.6-1. *Окно* графического **постпроцессора**

## Анализ перемещений

Анализ перемещений выполняется с помощью операций одноименного раздела (рис. 4.6-2) инструментальной панели. Для этого необходимо выполнить следующие действия:

- указанием на закладку активировать режим анализа перемещений;
- из списка **Выбор загружения** выбрать анализируемое загружение;
- в списке **Вид перемещений** выбрать направление перемещения;
- нажать кнопку вызова операции отображения результатов расчета (например, **Совместное отображение исходной и деформированной схемы** — рис. 4.6-1).

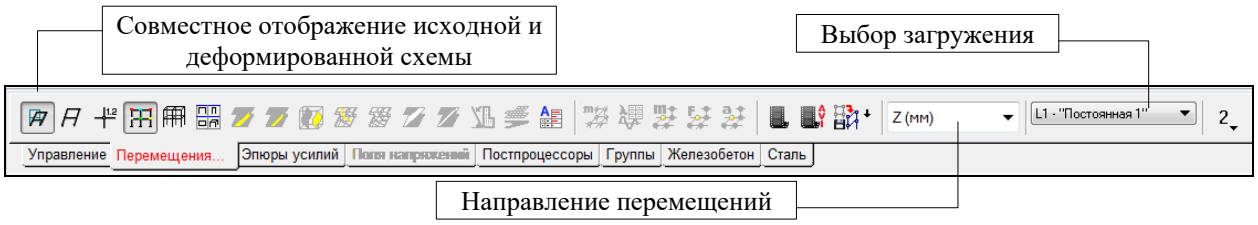



Рис. 4.6-2. *Инструментальная панель режима анализа перемещений*

Набор операций отображения позволяет получить различные формы представления результатов расчета перемещений. Каждой форме соответствует кнопка в инструментальной панели. При анализе перемещений от статических нагрузок в стержневых конструкциях можно воспользоваться кнопками:

 — совместное отображение исходной и деформированной схем;

 — отображение деформированной схемы;

 — вывод значений перемещений в узлах;

 — цветовая индикация величины перемещений в узлах;

 — отображение схемы.

При этом допускается совместное отображение деформированной схемы и одного из видов цветовой индикации, например, на рис. 4.6-1 показана индикация в виде цветовых маркеров в узлах исходной схемы и деформированное состояние конструкции.

## Анализ усилий

Поскольку независимо от режима в комплексе сохраняется преемственность функций управления, то анализ силовых факторов (в данном случае — построение эпюр) выполняется по тем же правилам, что и анализ перемещений.

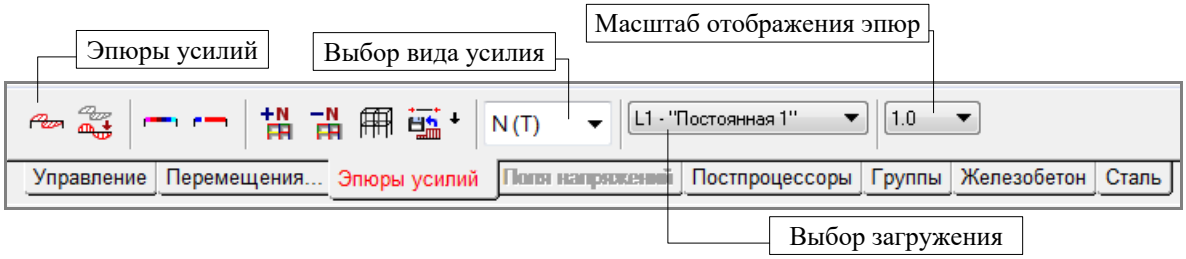



Рис. 4.6-3. *Инструментальная панель режима анализа усилий*

Для отображения эпюр усилий в одноименной инструментальной панели (рис. 4.6-3) можно воспользоваться следующими операциями:

 — эпюры усилий;

 — цветовая индикация положительных значений усилий;

 — цветовая индикация отрицательных значений усилий;

 — отображение схемы.

На рис. 4.6-4 приведен пример отображения усилий в элементах рамы с помощью различных средств (эпюры и цветовая индикация) и в различных окнах. Создание новых окон выполняется с помощью соответствующей команды в разделе меню ***Окно***. Правила использования многооконного режима приводятся в соответствующем разделе книги.

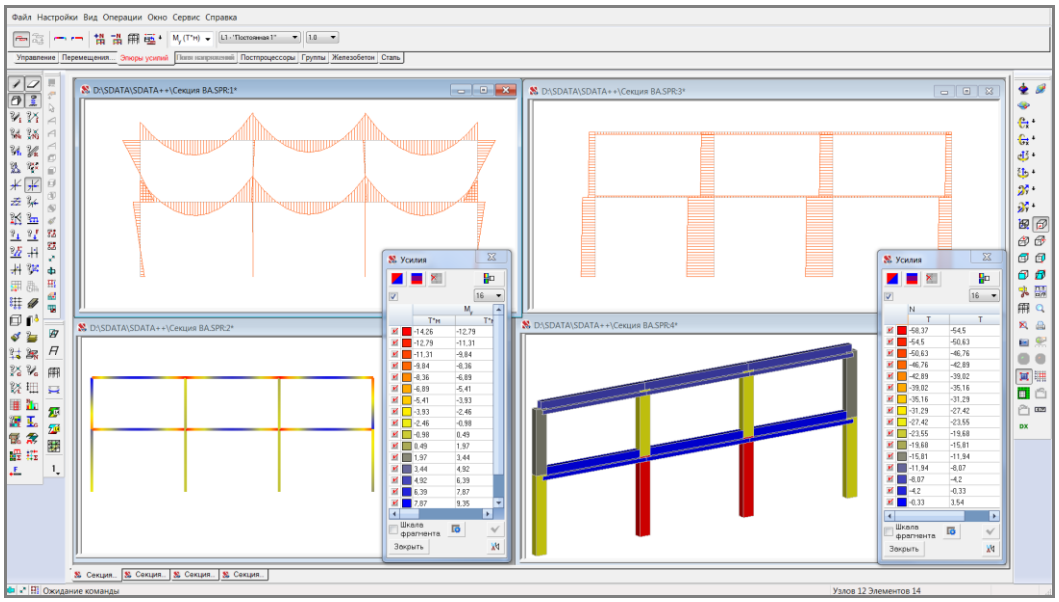


Рис. 4.6-4. *Пример отображения силовых факторов в многооконном режиме*

## 4.7. Формирование расчетной схемы из двумерных элементов

В этом разделе приводится пример формирования расчетной схемы из элементов оболочки. Рассматривается лежащая горизонтально прямоугольная оболочка, опертая по трем сторонам контура (рис. 4.7-1).

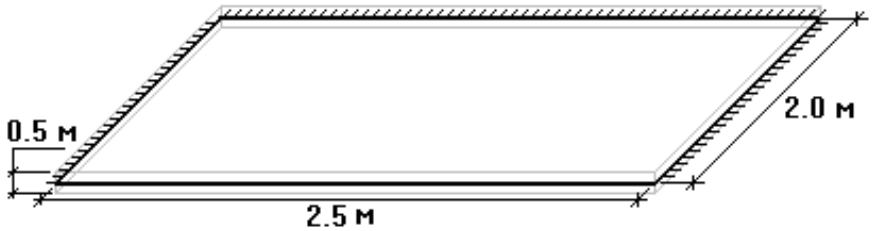



Рис. 4.7-1.

Аналогично предыдущему примеру, при создании схемы используется параметрическая модель, которая вызывается нажатием кнопки  — **Генерация прямоугольной сетки конечных элементов на плоскости**, расположенной в разделе **Схема** инструментальной панели (рис. 4.7-2).

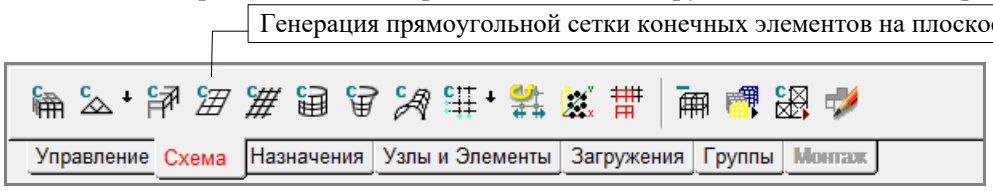



Рис. 4.7-2.

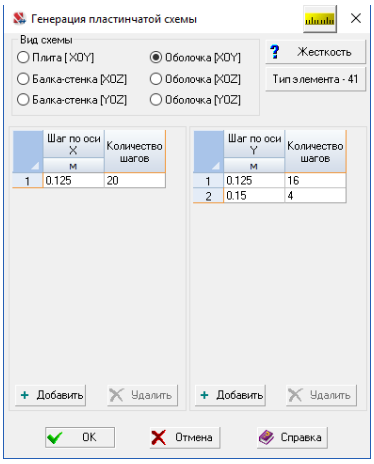



Рис. 4.7-3. *Диалоговое окно* **Генерация пластинчатой схемы**

В диалоговом окне **Генерация пластинчатой схемы** (рис. 4.7-3) задаются параметры схемы, к которым относятся:

- вид и положение схемы в пространстве — выберем **Оболочка [XOY]**;
- шаг конечных элементов вдоль оси X и количество шагов — введем шаг равный 0.125 м и количество шагов — 20;
- шаг конечных элементов вдоль другой оси, в зависимости от положения схемы (в нашем случае — оси Y), и количество шагов — введем шаг равный 0.125 м и количество шагов — 16.

Кроме того, из этого диалогового окна нажатием соответствующих кнопок вызывается операция назначения жесткости конечным элементам (КЭ) и выбирается их тип (диалоговые окна **Жесткости пластин** (рис. 4.7-4) и **Назначение типа элемента** (рис. 4.7-5) соответственно).

Для назначения жесткостных характеристик элементам оболочки достаточно в диалоговом окне **Жесткости пластин** выбрать из списка в группе **Материал** наименование материала и задать толщину пластин (например, бетон Б20 и 0.3 м). Тип элемента, например, КЭ 44 (четырехузловой конечный элемент оболочки общего вида) выбирается из списка диалогового окна **Назначение типа элемента**.

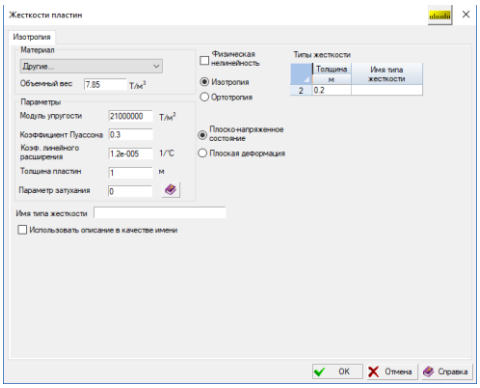



Рис. 4.7-4. *Диалоговое окно* **Жесткости пластин**

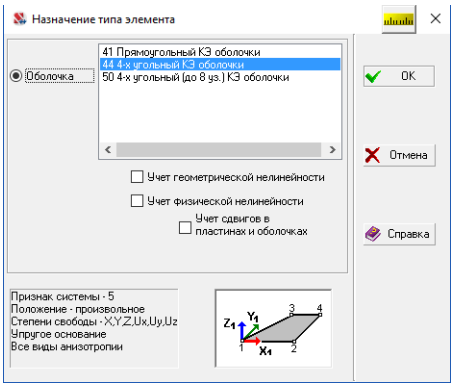



Рис. 4.7-5. *Диалоговое окно* **Назначение типа элемента**

После задания всех параметров и выхода из диалогового окна **Генерация пластинчатой схемы** (кнопка **ОК**) будет сформирована расчетная схема прямоугольной оболочки из квадратных четырехузловых конечных элементов (рис. 4.7-6).

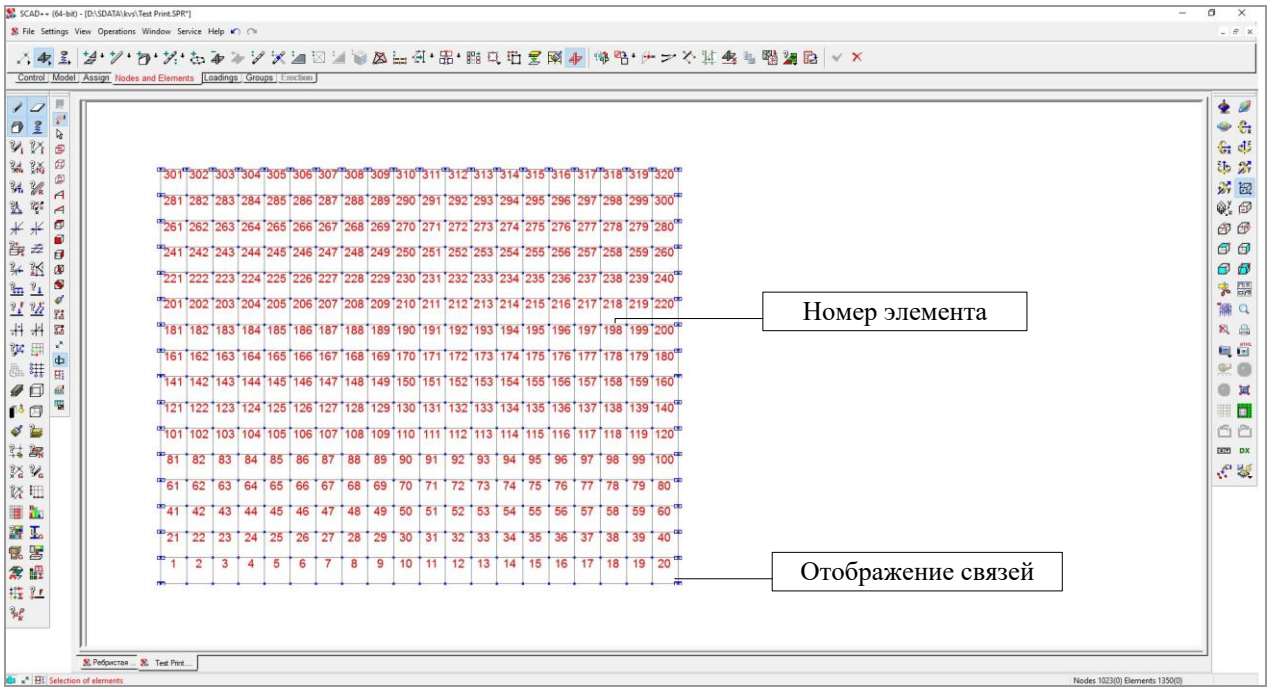



Рис. 4.7-6. *Расчетная схема оболочки*

## Назначение условий опирания

В качестве условий опирания примем жесткое защемление схемы по трем сторонам. Защемление реализуется путем установки связей в узлы, лежащие на контуре опирания.

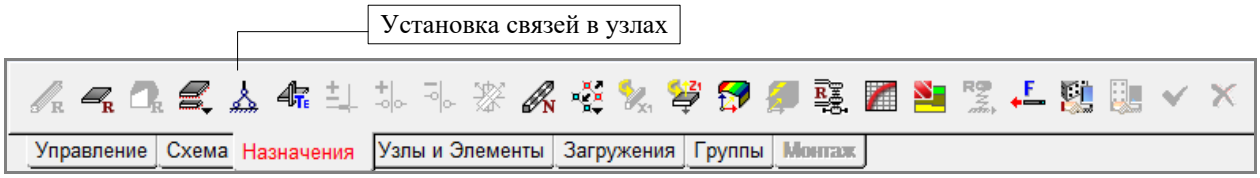



Рис. 4.7-7. *Инструментальная панель* **Назначения**

Для установки связей используется одноименная операция в разделе **Назначения** инструментальной панели (рис. 4.7-7). После нажатия кнопки **Установка связей в узлах** появляется диалоговое окно **Связи**, в котором путем активации маркеров отмечаются направления перемещений, на которые накладываются связи (рис. 4.7-8). Следующий порядок действий является стандартным — закрыть диалоговое окно (кнопка **OK**), выбрать с помощью одного из курсоров узлы, в которые устанавливаются связи, и нажать кнопку **OK** в инструментальной панели **Назначения** или клавишу **Enter** на клавиатуре.

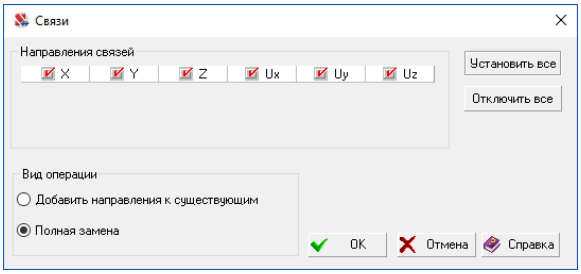



Рис. 4.7-8. *Диалоговое окно* **Связи**

## Задание нагрузок

Как и в предыдущем примере, управление вводом нагрузок и созданием загружений выполняется из инструментальной панели **Загружения**.

***При выполнении расчета по умолчанию предполагается, что заданы расчетные значения нагрузок, т. е. нормативные значения умножены на коэффициент надежности по нагрузке.***

В качестве первого загружения примем собственный вес плиты. Для его назначения используется одноименная операция в инструментальной панели (рис. 4.7-9). После нажатия кнопки **Собственный вес** появляется диалоговое окно, в котором задается коэффициент, с которым нагрузка от собственного веса будет включена в загружение (рис. 4.7-10).

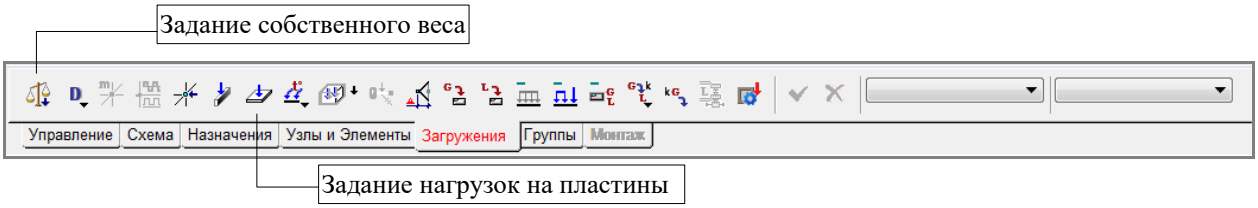



Рис. 4.7-9. *Инструментальная панель* **Загружения**

Для автоматического задания собственного веса необходимо, чтобы перед активацией этой операции были назначены жесткостные характеристики элементов, включающие описание сечения (для стержней) или толщину элемента (для пластин и оболочек), а также характеристики материала (удельный вес).

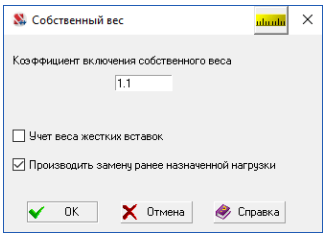



Рис. 4.7-10. *Диалоговое окно* **Собственный вес**

Нагрузка будет назначена элементам схемы после выхода из диалогового окна (кнопка **OK**). Как уже отмечалось выше, для записи загружения следует нажать кнопку **Сохранить/Добавить загружение** —  в инструментальной панели, после чего на экране появится диалоговое окно **Сохранение загружения** (рис. 4.4-15), где задаются тип загружения и вид нагрузки и выполняется запись загружения в проект.

Для подготовки схемы к заданию нового загружения ее следует очистить от ранее заданных нагрузок.

Во втором загружении приложим местную нагрузку (квадрат 0.5м × 0.5м) в центре плиты. Для этого выполним следующие действия:

- в инструментальной панели **Загружения** нажать кнопку **Нагрузки на пластины** (рис. 4.7-9);
- в диалоговом окне **Задание нагрузок на пластинчатые элементы** (рис. 4.7-11) в группе **Вид нагрузки** активировать маркер **Распределенная**;
- в группе **Направление действия нагрузки** активировать маркер Z;
- в группе **Значение нагрузки** задать нагрузку, например, 50 т/м$^2$;
- с помощью одного из курсоров выбрать на схеме элементы, которым назначается нагрузка (отмеченные элементы будут окрашены в красный цвет);
- нажать кнопку  в инструментальной панели режима **Загружения** или клавишу **Enter** на клавиатуре (если активировать фильтр **Распределенные нагрузки**, то введенная нагрузка будет показана на расчетной схеме — рис. 4.7-12);
- сохранить загружение (см. описание первого примера).

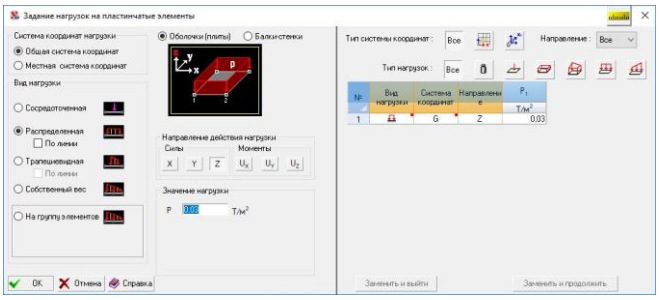


Рис. 4.7-11. *Диалоговое окно* **Задание нагрузок на пластинчатые элементы**

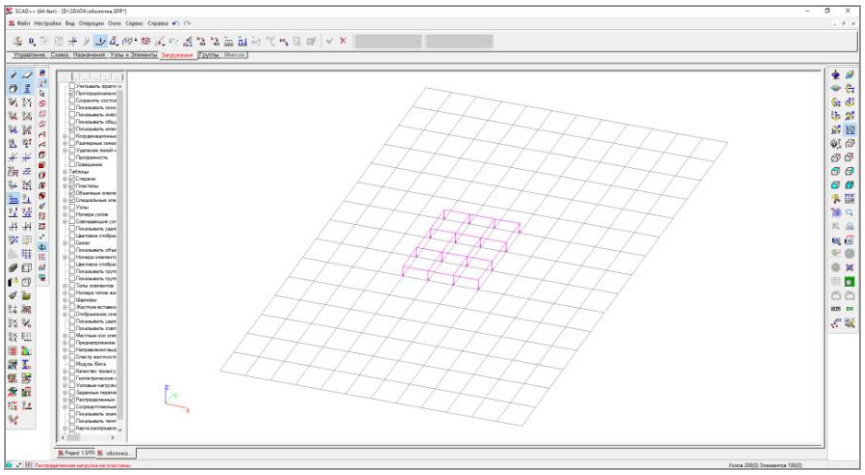


Рис. 4.7-12. *Нагрузка на плиту*

## Графический анализ результатов расчета

Выполнив расчет по правилам, приведенным в описании предыдущего примера, перейдем в режим графического анализа результатов. Для схем из двумерных элементов (пластины и оболочки) доступны следующие виды отображения результатов: деформированная схема, цветовые маркеры перемещений и силовых факторов, изолинии и изополя перемещений и силовых факторов (рис. 4.7-13).

В отличие от стержневых систем, для которых цветовая шкала перемещений может быть представлена только цветовыми маркерами в узлах, для систем из двумерных элементов кроме маркеров возможно построение изополей и изолиний. Управление выводом изополей и изолиний перемещений выполняется в инструментальной панели **Перемещения** (рис. 4.6-2). Для этого используются следующие кнопки:

 — отображение изополей перемещений;

 — отображение изополей и изолиний перемещений;

 — отображение изополей перемещений с постоянным (заданным) шагом;

 — отображение изолиний перемещений;

 — отображение изолиний перемещений с постоянным (заданным) шагом.

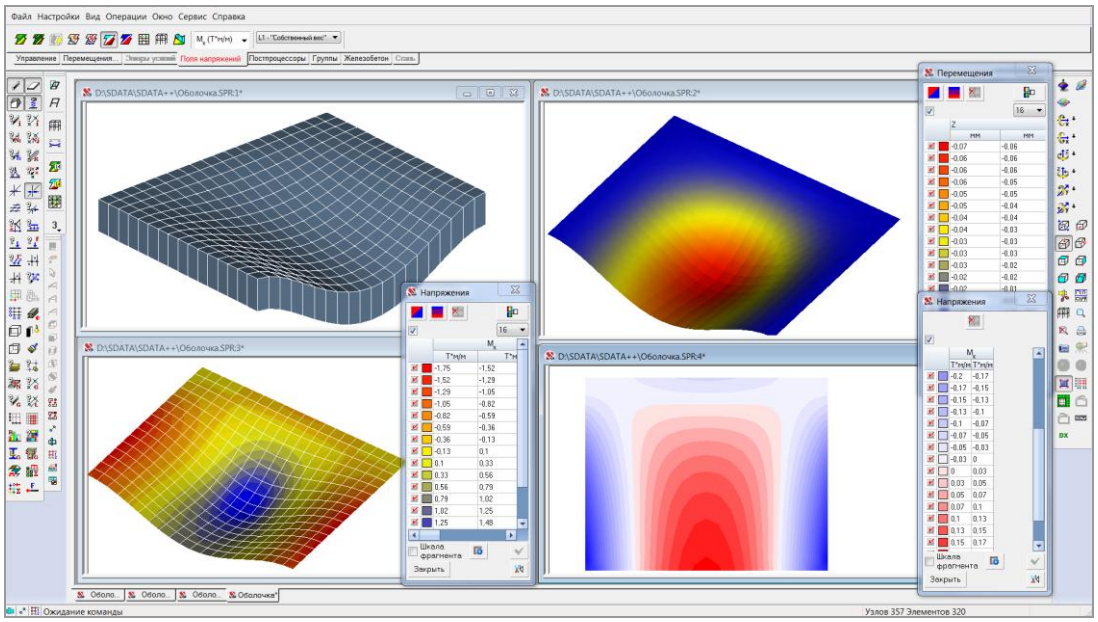


Рис. 4.7-13. *Различные формы отображения результатов расчета двумерных элементов*

Управление отображением результатов расчета силовых факторов для двумерных элементов выполняется из инструментальной панели **Поля напряжений** (рис. 4.7-14). Для этого используются следующие кнопки:

 — отображение изополей напряжений;

 — отображение изополей и изолиний напряжений;

 — отображение изополей напряжений с постоянным (заданным) шагом;

 — отображение изолиний напряжений;

 — отображение изолиний напряжений с постоянным (заданным) шагом;

 — построение эпюр напряжений вдоль секущей.

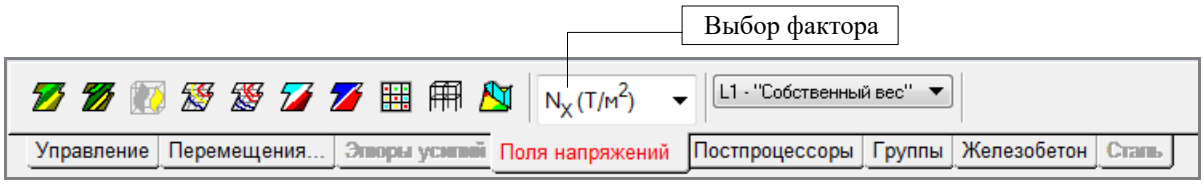



Рис. 4.7-14. *Инструментальная панель* **Поля напряжений**

## 4.8. ТАКИМ ОБРАЗОМ …

***Черная королева покачала головой:***
***Вы, конечно, можете называть это чушью, но я-то встречала такую чушь, что в сравнении с ней эта кажется толковым словарем.***

Л.КЭРРОЛЛ “Алиса в стране чудес”

… в главе **Structure CAD не только для ОРЛОВ** рассматривались простые и, как правило, чаще всего используемые на практике приемы работы с вычислительным комплексом. На примере решения простейших задач продемонстрирована последовательность действий от формирования

расчетной схемы до анализа результатов расчета, которая, несмотря на минимум использованных возможностей, в целом отражает технологию работы с программой.

Для начинающих пользователей можно сформулировать следующие основные требования к расчетной модели и принципы управления вычислительным комплексом:

1. В состав обязательных исходных данных, минимально необходимых для выполнения расчета, входят: геометрия расчетной схемы (описание узлов и элементов), жесткостные характеристики элементов, описание условий опирания (например, связей) и нагрузки.
2. Активация любых функций комплекса выполняется из **Дерева проекта**.
3. Подавляющее число операций формирования расчетной схемы может быть выполнено следующей последовательностью действий:
   - указанием курсора на закладку установить необходимый раздел в инструментальной панели;
   - нажать кнопку с пиктограммой выполняемой операции;
   - если для выполнения операции требуется дополнительная информация, то в появившемся диалоговом окне задать необходимые данные и выйти из окна нажатием кнопки **OK**;
   - выбрать (отметить курсором) нужные узлы или элементы (они будут перекрашены в красный цвет);
   - нажать кнопку **ОК** (**Подтверждение**) —  в том разделе **Инструментальной панели**, в котором выбиралась операция, или клавишу **Enter** на клавиатуре (клавиши **Enter** и **Esc** называют «горячими», ими можно пользоваться вместо кнопок инструментальной панели **Подтверждение** и **Отказ**);
   - если операция завершилась успешно, то элементы или узлы, участвующие в операции, будут снова перекрашены в цвет расчетной схемы; в противном случае будет выдано сообщение о причинах отказа от выполнения операции.
4. Для оперативного отражения на схеме результатов выполнения операций используется система фильтров отображения.
5. Расчет будет доступен в дереве проекта, если подготовленных данных о расчетной схеме достаточно для его выполнения.
6. Ход расчета отражается в протоколе, который содержит информацию о выполненных действиях, а также о замечаниях и ошибках, обнаруженных в процессе расчета.
7. Если расчет завершился успешно (в данном случае речь идет только о том, что сформированы файлы с результатами расчета, а не качество результатов), то в дереве проекта в разделе **Результаты** будет доступна функция **Графический анализ**.
8. При графическом анализе результатов рекомендуется действовать в такой последовательности:
   - указанием курсора на закладку установить раздел инструментальной панели с интересующей информацией (**Перемещения**, **Эпюры усилий**, **Поля напряжений**);
   - в списке загружений выбрать нужное загружение;
   - в списке факторов (направление перемещений или вид силового фактора) установить анализируемый фактор;
   - нажать кнопку, соответствующую выбранной форме представления результата (деформированная схема, эпюры, изополя и т. п.).
9. Для сравнения различных результатов, например, перемещений от разных загружений, можно воспользоваться отображением различных анализируемых факторов в отдельных окнах.

# 5. Создание расчетной схемы

В разделе инструментальной панели **Схема** сосредоточены операции, позволяющие сформировать расчетную схему или ее часть на основе параметрических прототипов конструкций. Кроме того, операции этого раздела используются для модификации модели с использованием механизмов аффинных преобразований, копирования, сборки и др.

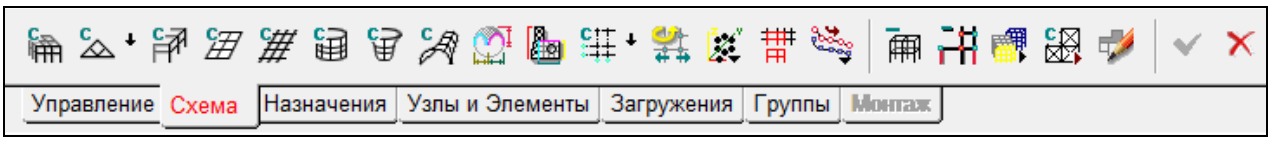



Рис. 5-1. *Раздел* **Схема** *инструментальной панели препроцессора*

Из раздела **Схема** вызываются следующие операции:

 — генерация прототипа рамы;

 — генерация прототипа фермы;

 — дублирование вдоль оси;

 — генерация прямоугольной сетки элементов на плоскости;

 — генерация балочного ростверка;

 — создание поверхностей вращения;

 — создание поверхности вращения по заданной формуле;

 — создание поверхности по заданной формуле;

 — создание стандартной аналитической поверхности;

 — создание стандартных конструкций;

 — задание сетки разбивочных осей;

 — геометрические преобразования;

 — копирование схемы;

 — копирование фрагмента схемы;

 — создание и корректировка **траектории**;

 — удаление схемы;

 — удаление выбранных объектов;

 — сборка схемы из нескольких схем (**Режим сборки**);

 — генерация сетки произвольной формы на плоскости;

 — вызов графического редактора.

Поскольку большинство операций раздела **Схема** выполняются сразу после ввода параметров в диалоговых окнах и не требуют специального подтверждения, кнопки **OK** —  и **Отмена** —  в этом разделе инструментальной панели отсутствуют.

## 5.1. Расчетные схемы рамных стержневых конструкций

### Операция Генерация прототипа рамы



Эта операция обеспечивает формирование двух видов рамных стержневых систем на основе параметрических прототипов — многоэтажные многопролетные рамы, одноэтажные многопролетные рамы промышленных зданий и однопролетные рамы из двутавров переменного сечения. Выбор конфигурации рамы выполняется в одноименном диалоговом окне (рис. 5.1-1) путем указания курсором на соответствующую пиктограмму.

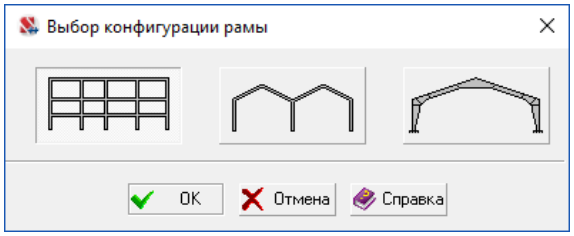



Рис. 5.1-1. *Диалоговое окно* **Выбор конфигурации рамы**

### Многоэтажные многопролетные рамы

Ввод данных, необходимых для формирования схемы многоэтажной многопролетной рамы, выполняется в диалоговом окне **Задание параметров регулярной рамы** (рис. 5.1-3). В этом окне задаются размеры рамы, назначаются жесткости элементов и типы конечных элементов, накладываются связи в узлах. Для ввода размеров используются две таблицы: левая — для описания пролетов и правая — для описания этажей.

Активация маркера **Автоматическая установка связей** означает, что в основании колонн сгенерированной рамы будут назначены связи по направлениям, соответствующим активным (нажатым) кнопкам-маркерам с наименованием степеней свободы. По умолчанию активируются маркеры, соответствующие степеням свободы, определяемым типом расчетной схемы.

Кнопки **Колонны** и **Ригели** служат для ввода жесткостных характеристик соответствующим элементам схемы, а кнопка **Тип элемента** — для назначения типов конечных элементов. Эти данные задаются с помощью соответствующих операций в инструментальной панели **Назначение** и описаны в разделе 7 (Задание характеристик узлов и элементов).

По умолчанию рама будет расположена в плоскости XOZ. Маркер **Вдоль оси Y** позволяет разместить конструкцию в плоскости YOZ.

В программе практически отсутствуют ограничения на количество задаваемых пролетов и этажей («практически», в данном случае, равно 32000). Кроме того, открытые по умолчанию в этом диалоговом окне степени свободы, на которые накладываются связи, ограничены шестью. Если созданная стержневая модель предусматривает использование большего числа степеней свободы (например, признаки схемы 8 или 9), то недостающие связи в узлах необходимо назначить, используя для этого соответствующую операцию из раздела **Назначение** инструментальной панели.

В тех случаях, когда сечения отдельных ригелей или колонн отличаются от заданных при генерации рамы (например, часть ригелей имеет другое сечение), следует воспользоваться операцией **Назначение жесткостей стержням** —  из раздела **Назначение** инструментальной панели и задать этим элементам необходимые характеристики. Но, как правило, для генерации геометрии расчетной схемы достаточно заполнить только данные в таблицах.

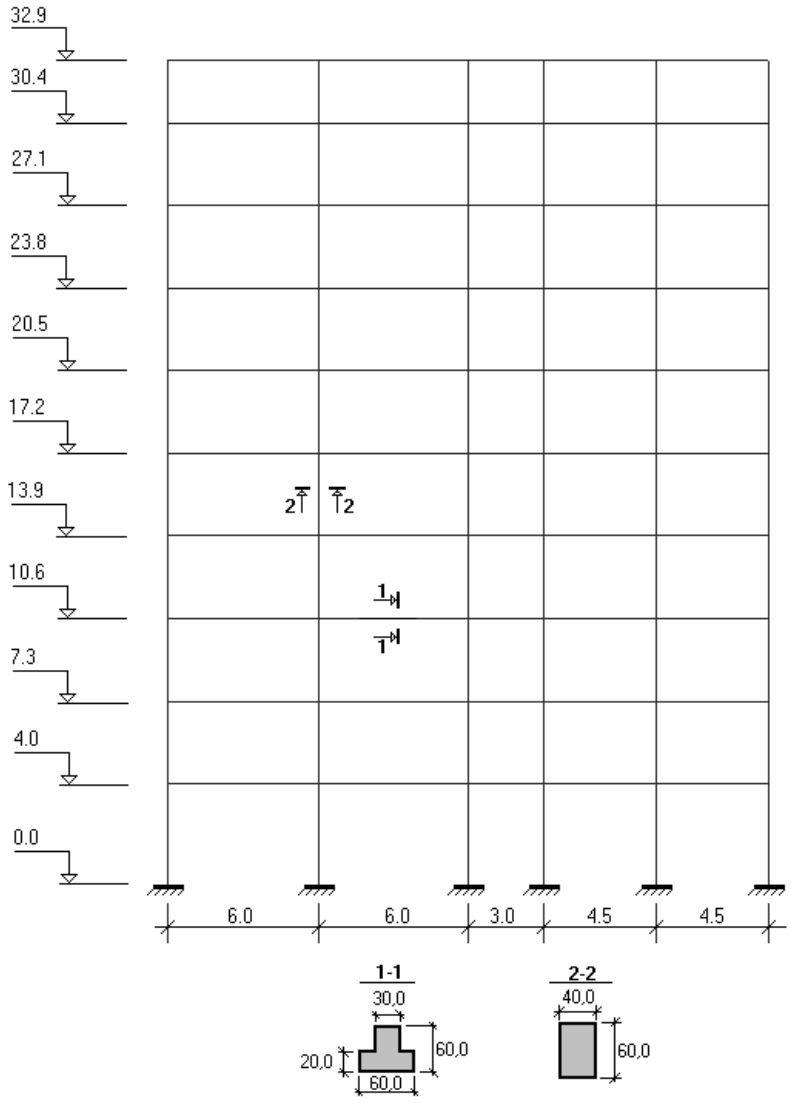



Рис. 5.1-2.

В качестве примера многоэтажной многопролетной рамы, который будет использован при описании технологии работы по созданию расчетной схемы, рассмотрим раму (рис. 5.1-2), имеющую пять пролетов (2×6 м, 3 м, 2×4.5 м) и 10 этажей (4 м, 8×3.3 м, 2.5 м).

Диалоговое окно, с исходными данными для генерации этой рамы показано на рисунке 5.1-3.

Если все необходимые параметры рамы определены, то после нажатия кнопки **ОК** выполняется генерация схемы (результат для приведенного выше примера показан на рис. 5.1-4).

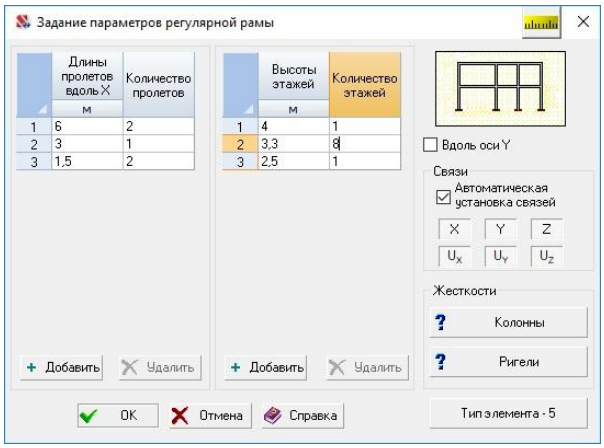



Рис. 5.1-3. *Диалоговое окно* **Задание параметров регулярной рамы**

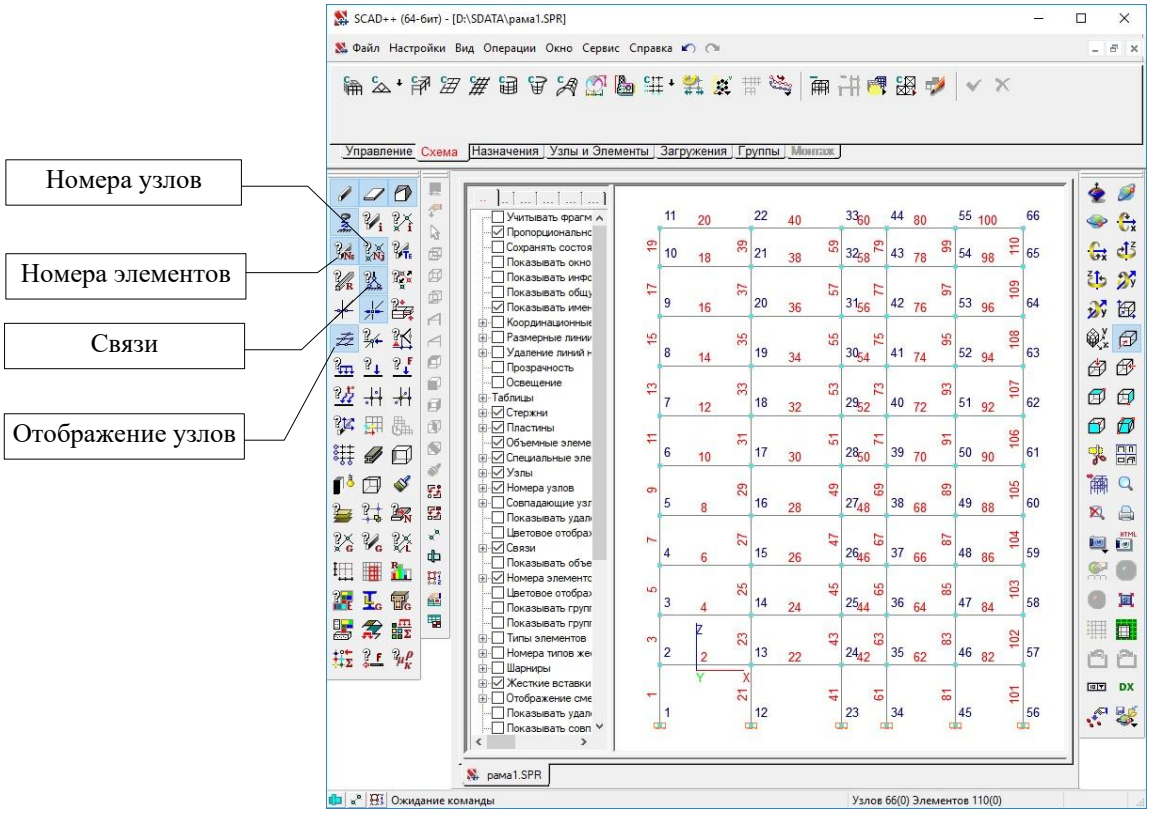



Рис. 5.1-4. *Расчетная схема многоэтажной многопролетной рамы*

## Одноэтажные многопролетные рамы промышленных зданий

С помощью этого параметрического прототипа можно сгенерировать расчетную схему одно или многопролетной одноэтажной рамы с различной конфигурацией ригеля (двухскатный симметричный, двухскатный несимметричный, односкатный), а также учесть наличие подкрановых балок. Исходные данные, необходимые для генерации рамы задаются в диалоговом окне **Одноэтажная рама** (рис. 5.1-6) и включают:

- длины пролетов и их количество (задаются в таблице);
- высота колонн — H;
- уклон ригеля — p (в процентах, принят одинаковым во всех пролетах);
- положение конькового узла (задается отношением расстояния от узла до левой колонны — $L_c$ к длине пролета — $L_p$).

Кроме того, в диалоговом окне предусмотрены:

- автоматическая установка связей в основании колонн (активен маркер **Установка связей**) и указываются направления степеней свободы перемещений, на которые накладываются связи;
- моделирование конструкции подкрановых балок (активен маркер **Подкрановая балка**) и задаются высотное — h и плановое — w положение опор подкрановых балок (рис. 5.1-6, *б*);
- задание жесткостных характеристик колонн и ригелей — используются одноименные кнопки (принято, что все ригели имеют одинаковое сечение и все колонны имеют одинаковое сечение);
- назначение типа конечных элементов (по умолчанию принимается соответствующим типу схемы, т. е., если в идентификационных данных проекта установлен тип 2, то элементы будут типа 2, если 5, то и элементы соответственно — типа 5);

По умолчанию рама будет расположена в плоскости XOZ. Маркер **Вдоль оси Y** позволяет разместить конструкцию в плоскости YOZ.

В качестве примера одноэтажной многопролетной рамы рассмотрим раму с двухскатными симметричными ригелями (рис. 5.1-5), имеющую три пролета (24 м, 36 м и 24 м) и высоту колонн 12 м, уклон ригелей 20%, отметка привязки подкрановой балки 8 м и величина смещения осей подкрановой части относительно надкрановой — 0.5 м.

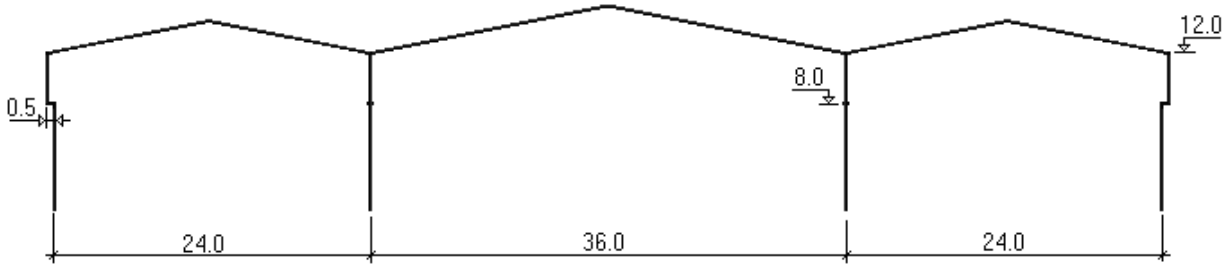
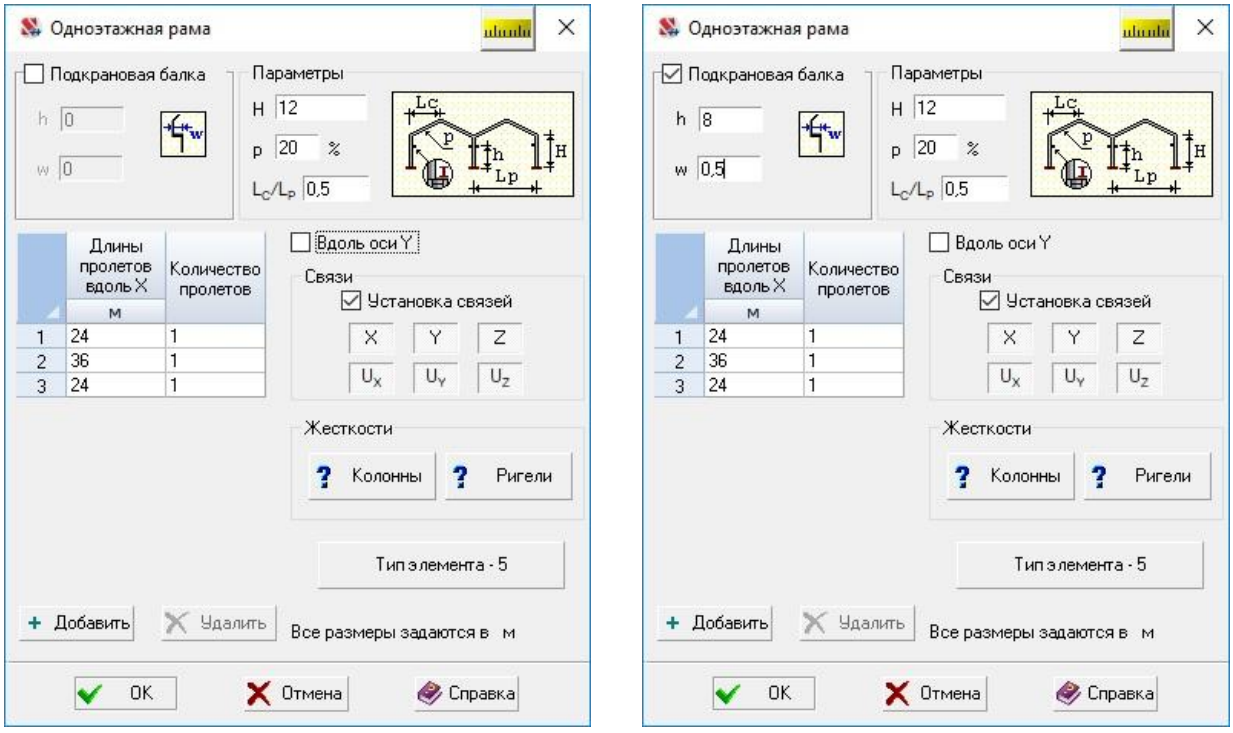



Рис. 5.1-5. *Одноэтажная многопролетная рама*




*а*) *б*)

Рис. 5.1-6. *Диалоговое окно* **Одноэтажная рама** *с исходными данными, необходимыми для формирования расчетной схемы: а) без подкрановой балки и б) с подкрановой балкой*

Для моделирования опирания подкрановых балок на крайних колоннах в расчетной схеме предусматривается смещение осей подкрановой части колонны относительно надкрановой части с использованием жестких вставок. На средних колоннах вводятся промежуточные узлы и выбор способа моделирования опирания подкрановых балок (введение консолей, приведение нагрузок к центральному узлу и т. п.) остается за пользователем. Для отображения на схеме жестких вставок используется одноименная кнопка фильтров  . Так как в данном случае жесткие вставки вводятся по направлению местной оси $Z_1$ элемента, то при отключенной кнопке фильтра элементы, моделирующие надкрановую часть колонны, будут отображаться под углом (рис. 5.1-7).

Изменяя положение конькового узла в пролете, можно получить различные очертания ригеля. Если $L_c/L_p = 0.5$, то коньковый узел будет размещаться в центре пролета, т.е будет сформирована схема с симметричным двухскатным ригелем. При значении $L_c/L_p = 1$ — ригель будет односкатным с коньковым узлом у правой колонны, а при $L_c/L_p = 0$ — у левой. Для значений $0 < L_c/L_p < 1$, отличных от 0.5, будет сформирована схема с несимметричным двухскатным ригелем.

Следует отметить, что параметры, заданные в диалоговом окне **Одноэтажная рама**, одинаковы для всех пролетов. Если какие-то пролеты отличаются от других, то после генерации схемы следует воспользоваться соответствующими операциями и изменить их характеристики (например, для изменения сечений элементов или угла их разворота — воспользоваться соответствующими операциями инструментальной панели **Назначение**, а для изменения геометрии рамы — операциями инструментальной панели **Узлы и Элементы**).

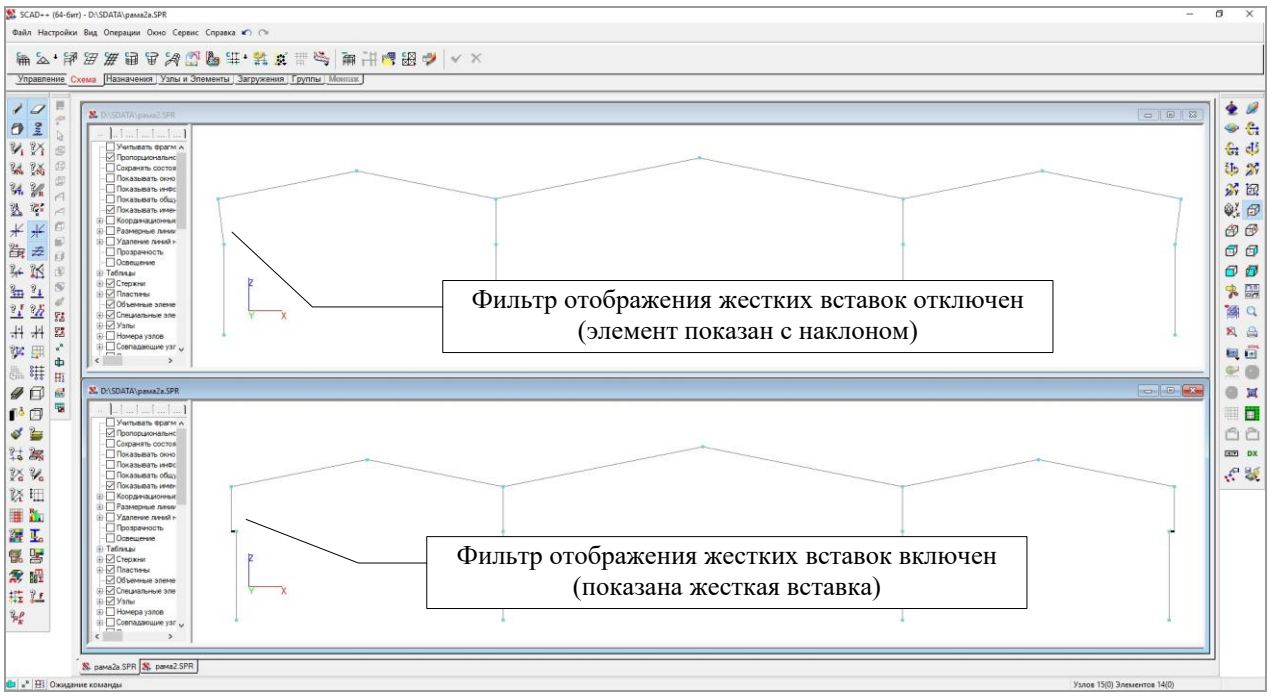



Рис. 5.1-7. *Отображение жестких вставок на расчетной схеме*

## Однопролетные рамы из двутавров переменного сечения

Параметрическая модель позволяет сформировать расчетную схему однопролетной рамы из сварных двутавров переменного сечения с двухскатным ригелем. Рассматриваются рамы со следующими условиями опирания стоек и примыкания ригеля:

- шарнирное опирание стоек и жесткое примыкание ригеля к стойкам и в коньке;
- шарнирное опирание стоек, жесткое примыкание ригеля к стойкам и шарнирное в коньке;
- жесткое опирание стоек, жесткое примыкание ригеля к стойкам и в коньке;
- жесткое опирание стоек, шарнирное примыкание ригеля к стойкам и жесткое в коньке;
- жесткое сопряжение всех элементов.

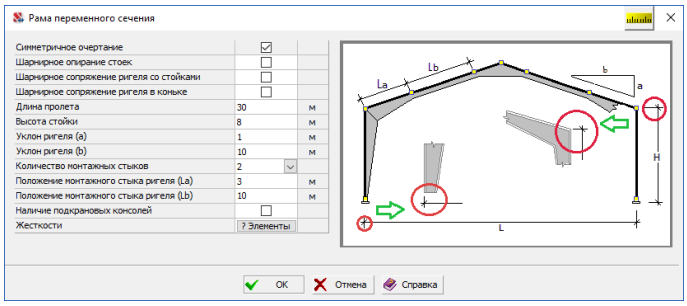



Рис. 5.1-8. Диалоговое окно **Рама переменного сечения**

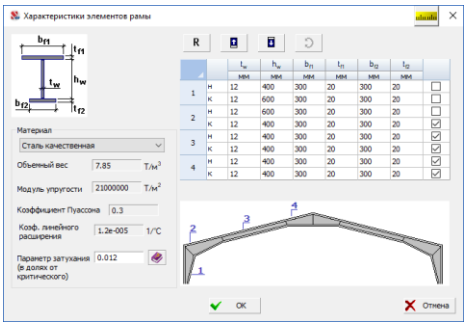



Рис. 5.1-9. Диалоговое окно **Характеристики элементов рамы**

Предусмотрена возможность задания ригеля с промежуточными монтажными стыками (без учета конька), состоящего из комбинации элементов переменного и постоянного сечений, а также использования в стойках сварных двутавров как постоянного, так и переменного сечения. Исходные данные, необходимые для генерации расчетной модели рамы, задаются в диалоговом окне **Рама переменного сечения** (рис. 5.1-8). В их составе:

- признак опирания оснований стоек (шарнирное/жесткое);
- признак сопряжения ригеля со стойкой (шарнирное/жесткое);
- признак сопряжения ригеля в коньке (шарнирное/жесткое);
- длина пролета рамы;
- высота стойки (отметка верха карнизного узла);
- уклон ригеля (задается параметрами a и b);
- количество монтажных стыков ригеля в половине пролета рамы (0, 1, 2);
- расстояние от карнизного узла до первого монтажного стыка ригеля (при наличии стыков);
- расстояние между монтажными стыками (при наличии двух стыков);
- признак наличия подкрановых консолей;
- расстояние от основания стойки до подкрановой консоли (при наличии консоли).

Характеристики стоек и элементов ригеля назначаются в зависимости от выбранного варианта исполнения рамы и задаются в одноименном диалоговом окне (рис. 5.1-9). Окно вызывается нажатием кнопки **Элементы**, и включает описание материала (стали) и размеры сечений элементов в начале и конце каждого элемента конструкции. Приняты следующие правила задания сечений:

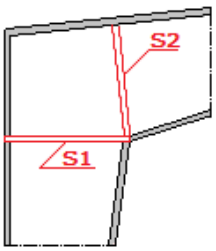



Рис. 5.1-10

- «началом» элемента считается первый узел (начало местной системы координат стержня);
- размеры сечений стойки (S1) и ригеля (S2) определяются примыканием к карнизному узлу (рис. 5.1-10);
- высота стенок в месте стыка соседних участков ригеля должна быть одинаковой;
- верхние грани стенок участков ригеля лежат на одной прямой, угол наклона которой определяется значением уклона;
- независимо от толщины полок различных участков ригеля (при наличии монтажных стыков) постоянный уклон по длине верхней грани полок обеспечивается автоматически, введением жестких вставок;
- подкрановая консоль допускается только для стоек постоянного сечения.

Размеры сечений задаются в табличном виде. Управление таблицей выполняется с помощью набора кнопок, которые позволяют скопировать содержимое строки или использовать при вводе

информацию о ранее введенных жесткостных характеристиках элементов. Правила работы с кнопками управления следующие:

- по нажатию кнопки «Вниз» содержимое верхней из отмеченных строк будет скопировано во все нижележащие отмеченные строки;
- по нажатию кнопки «Вверх» содержимое нижней из отмеченных строк будет скопировано во все вышележащие отмеченные строки;
- по нажатию кнопки «Обмен» содержимое двух отмеченных строк поменяется местами;
- для доступа к ранее введенным данным о жесткостях элементов используется кнопка **R** (Read), после нажатия которой появится диалоговое окно **Жесткость стержневых элементов**. Размеры сечения, соответствующие выбранному из таблицы этого окна типу жесткости, будут записаны в строки, отмеченные в таблице сечений элементов рамы (после выхода из окна по кнопке **OK**).

Следует помнить, что из жесткостных характеристик элементов в таблицу могут быть перенесены только данные стержней переменного сечения.

## 5.2. Формирование схем плоских шарнирно-стержневых систем



Для формирования расчетной схемы фермы можно воспользоваться имеющейся в комплексе библиотекой параметрических прототипов. Выбор прототипа фермы осуществляется по двум параметрам — очертанию поясов и схеме решетки.

Если указать курсором на стрелку, стоящую справа от кнопки **Генерация прототипа фермы**  , то появится меню, в котором выбирается материал фермы (**Генерация прототипа стальной фермы** или **Генерация прототипа деревянной фермы**). При этом предполагается, что стальная ферма выполнена из прокатных уголков или труб круглого и прямоугольного (квадратного) сечения, а деревянная — из круглого или прямоугольного бруса. В случае, когда в процессе генерации не предусматривается назначение жесткостных характеристик элементам фермы, используется кнопка  .

### Генерация прототипа стальной фермы

Выбор очертания поясов фермы, схемы решетки и задание параметров фермы выполняется в двухстраничном диалоговом окне **Генерация прототипа фермы** (рис. 5.2-1). В программе реализована генерация ферм со следующими очертаниями поясов:

- фермы с параллельными поясами;
- треугольные фермы;
- трапецеидальные фермы;
- фермы с полигональным верхним поясом;
- односкатные фермы;
- двухскатные фермы.

Рекомендуется следующий порядок задания данных в этом окне:

на странице **Общие данные**:

- выбрать очертание поясов фермы из одноименного списка;
- активировать пиктограмму с изображением схемы решетки;
- в таблице задать размеры фермы и количество элементов пояса (для контроля геометрии фермы можно воспользоваться кнопкой **Предварительный просмотр** —  , по нажатию которой появляется окно с изображением фермы);
- перейти на страницу **Сечения** (рис. 5.2-2);

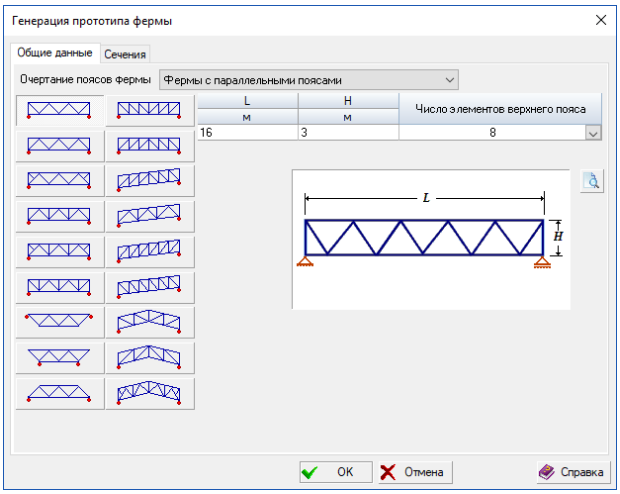



Рис. 5.2-1. *Страница* **Общие данные** диалогового окна **Генерация прототипа фермы**

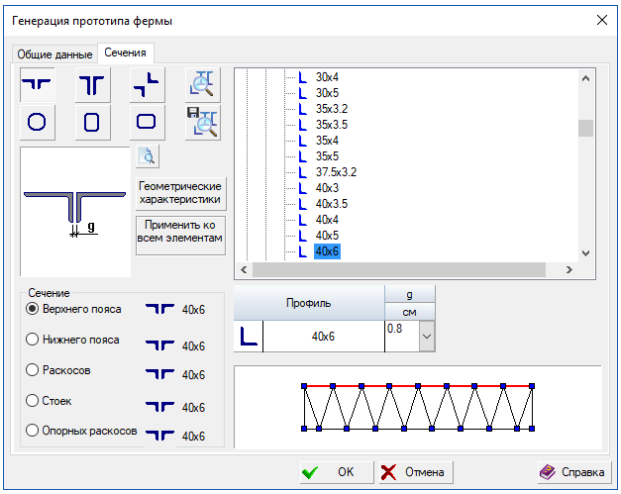



Рис. 5.2-2. *Страница* **Сечения** диалогового окна **Генерация прототипа фермы**

на странице **Сечения**:

- выбрать кнопку-маркер с изображением профиля элементов фермы;
- активировать маркер в группе **Сечение**, например, **Верхний пояс** (на эскизе фермы выбранный элемент будет выделен красным цветом);
- в списке сортаментов металлопроката выбрать сечение указанного элемента фермы (наименование выбранного профиля будет показано в таблице **Профиль**);
- выбрать толщину фасонки g из списка в таблице **Профиль**;
- повторить три предыдущие операции для других элементов фермы;
- выйти из диалогового окна нажатием кнопки **OK**.

Если параметры фермы заданы корректно, то на экране будет показана ее расчетная схема (рис. 5.2-3).

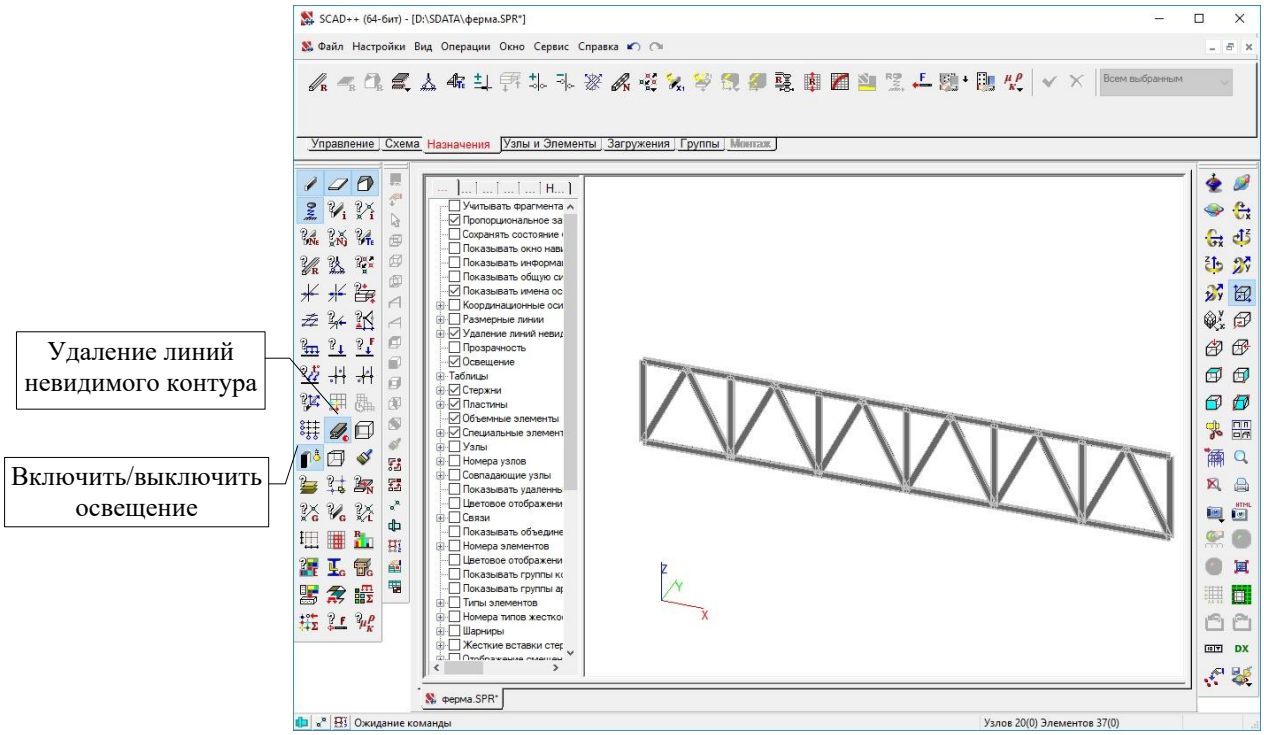



Рис. 5.2-3. *Расчетная схема фермы*

## Работа на странице Сечения (дополнительные возможности)

Выбор сечения элементов фермы выполняется с помощью следующих кнопок-маркеров:

 — парные уголки тавром, соединенные меньшими полками;

 — парные уголки тавром, соединенные большими полками;

 — уголки равнополочные, собранные крестом;

 — трубы круглые;

 — трубы прямоугольные с большей стороной по вертикали или квадратные;

 — трубы прямоугольные с большей стороной по горизонтали или квадратные.

После выбора вида сечения в списках сортаментов металлопроката будут доступны только те позиции, которые соответствуют выбранному сечению.

Для запоминания часто используемых профилей или комбинаций парных уголков в программе предусмотрена возможность создания библиотеки пользовательских сечений. Кнопки **Сохранить сечение в базе данных пользователя** —  и **Загрузить сечение из базы данных пользователя** —  позволяют использовать сечения созданные не только в комплексе **SCAD**, но и в других приложениях системы **SCAD Office** (например, в программе **Кристалл**). Файл базы пользовательских сечений ***UserSectionStorage.uss*** сохраняется в разделе **Application Data** системной директории **Documents and Settings**.

Кнопка **Предварительный просмотр** —  открывает одноименное окно с изображением эскиза выбранного сечения (рис. 5.2-4).

Кнопкой **Геометрические характеристики** вызывается окно **Свойства сечения**, в котором наряду с эскизом сечения в табличном виде представлены его геометрические характеристики (рис. 5.2-5).

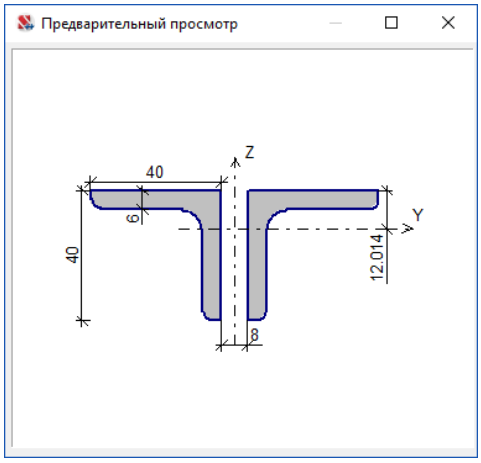



Рис. 5.2-4. *Окно* **Предварительный просмотр**

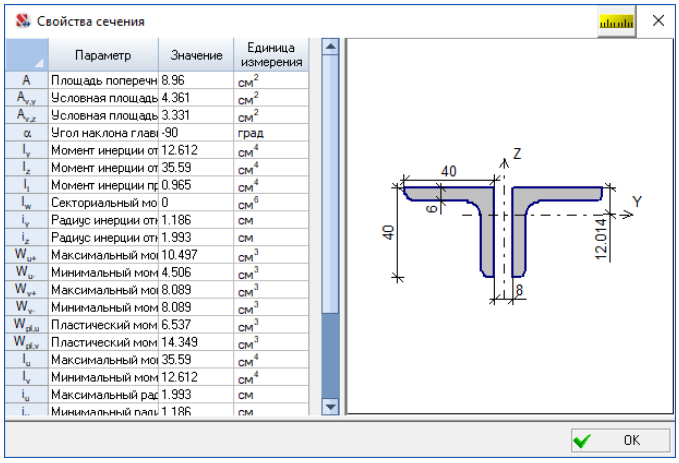



Рис. 5.2-5. *Окно* **Свойства сечения**

Кнопка **Применить ко всем сечениям** используется в тех случаях, когда все или большинство элементов фермы имеют одинаковое сечение. Для того чтобы воспользоваться этой кнопкой следует назначить сечение одному из элементов и, не меняя активный маркер, нажать указанную кнопку. Все элементы схемы получат указанное сечение. Если в схеме есть элементы с другим сечением, то им нужно назначать сечение после выполнения рассматриваемой операции.

### Генерация прототипа деревянной фермы

Формирование прототипа деревянной фермы выполняется по тем же правилам, что и стальной. Количество прототипов деревянной фермы значительно меньше и все они представлены на странице **Общие данные** (рис. 5.2-6).

В программе предусмотрены два вида сечений для элементов деревянных ферм — прямоугольное (квадратное) и круглое из неклеенной древесины. Элементы управления и правила работы на странице **Сечения** (рис. 5.2-7) совпадают с рассмотренными выше для стальных ферм. Модуль упругости и коэффициент Пуассона для дерева в жесткостных характеристиках элементов назначаются в соответствии с установленными нормами проектирования.

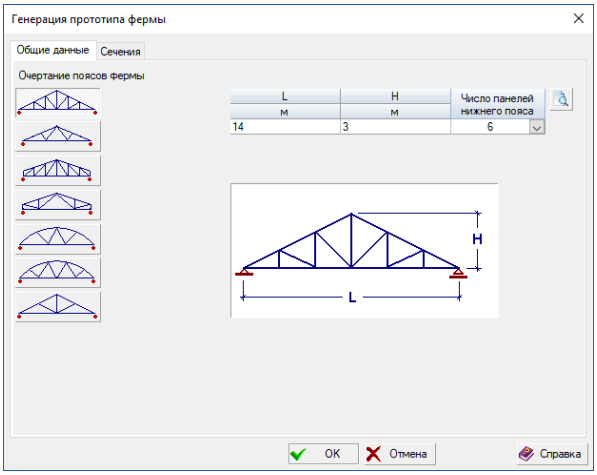



Рис. 5.2-6. *Страница* **Общие данные** *при генерации прототипа деревянной фермы*

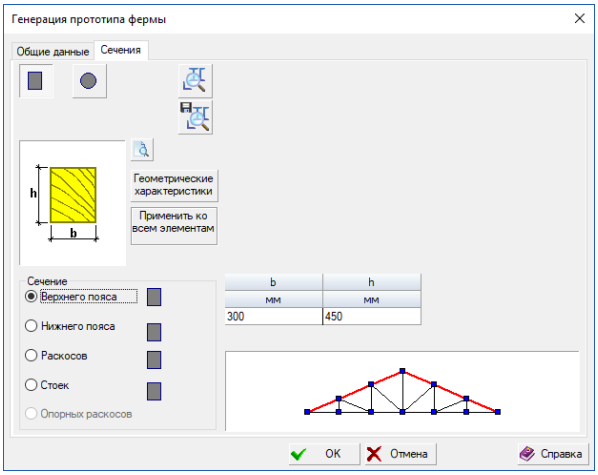



Рис. 5.2-7. *Страница* **Сечения** *при генерации прототипа деревянной фермы*

### Генерация ферм с элементами произвольного сечения

Этот режим используется в тех случаях, когда сечения элементов отличаются от предусмотренных в режимах генерации ферм из стального проката и дерева. В этом случае формируется только геометрия схемы, а жесткостные характеристики элементов задаются операцией **Назначение жесткостей стержням** —  в разделе инструментальной панели **Назначение**. Выбор конфигурации фермы выполняется в окне **Общие данные** (рис. 5.2-1) по тем же правилам, что и для ферм из стального проката.

## 5.3. Пространственные рамы и фермы



В тех случаях, когда прототип стержневой системы представляет собой плоскую конструкцию, лежащую в плоскости, параллельной одной из координатных плоскостей, его можно использовать для формирования пространственной стержневой системы с помощью операции **Дублирование вдоль оси** —  .

В основе этой операции лежит принцип дублирования расположенной в плоскости поперечной конструкции, например, плоской рамы, фермы или балочного ростверка с заданным шагом в направлении выбранной пользователем оси в правой декартовой системе координат XYZ. При этом продольные конструкции образуются путем порождения стержней в направлении выбранной оси из каждого узла поперечной конструкции (за исключением опорных узлов колонн рамы).

При вызове операции дублирования появляется диалоговое окно **Схема продольного каркаса** (рис. 5.3-1). В этом окне вводится направление дублирования, шаг дублирования и количество

повторений (шаг может быть переменным), а также назначаются жесткостные характеристики стержней, введенных в направлении выбранной оси (кнопка **Профиль**). При этом сечения всех элементов продольной конструкции приняты одинаковыми. Изменение сечений элементов продольного каркаса выполняется операцией **Назначение жесткостей стержням** —  в разделе инструментальной панели **Назначение**.

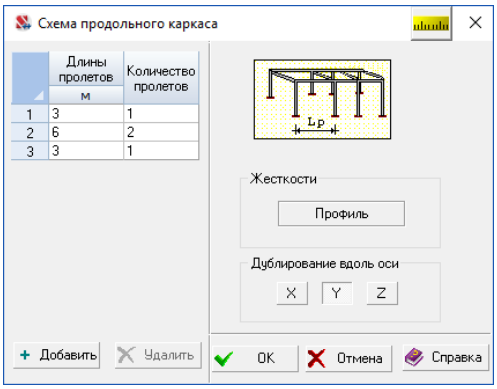



Рис. 5.3-1. *Диалоговое окно* **Схема продольного каркаса**

Для дублирования произвольных стержневых систем используются операции копирования, которые рассматриваются ниже.

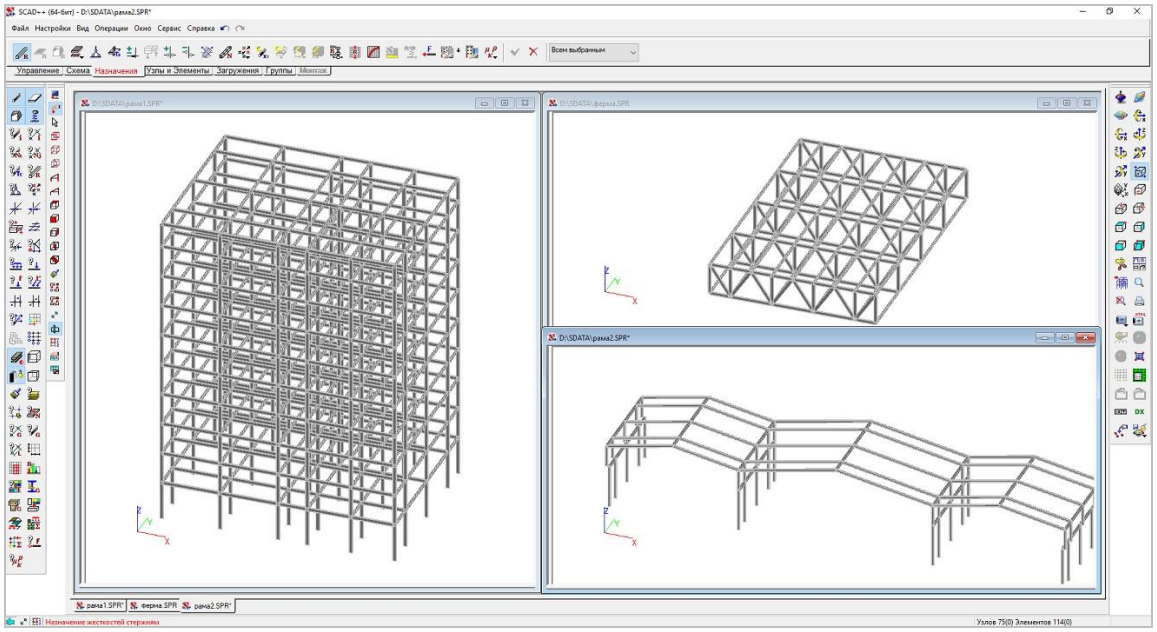


Рис. 5.3-2. *Примеры использования операции* **Дублирование вдоль оси** *для различного вида стержневых систем*

В качестве примеров выполнения операции дублирования представлены расчетные схемы многоэтажной многопролетной рамы, одноэтажной рамы и фермы, рассмотренные ранее в текущей главе (рис. 5.3-2).

## 5.4. Формирование расчетной схемы балочного ростверка



Для формирования расчетной схемы балочного ростверка предусмотрена соответствующая операция в разделе **Схем**а. Исходные данные для этого вида схем задаются в одноименном

диалоговом окне (рис. 5.4-1) аналогично рассмотренным ранее параметрическим прототипам. В двух таблицах диалогового окна задаются шаг и количество шагов ростверка вдоль осей X и Y соответственно. Жесткостные характеристики элементов (кнопка **Жесткость**) и их тип (кнопка **Тип элемента**) назначаются аналогично одноименным операциям при генерации параметрических прототипов рам.

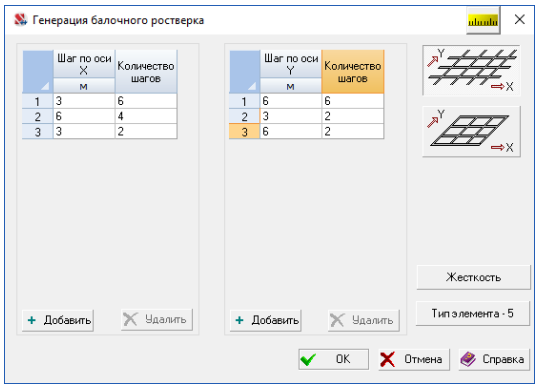



Рис. 5.4-1. *Диалоговое окно*
**Генерация балочного ростверка**

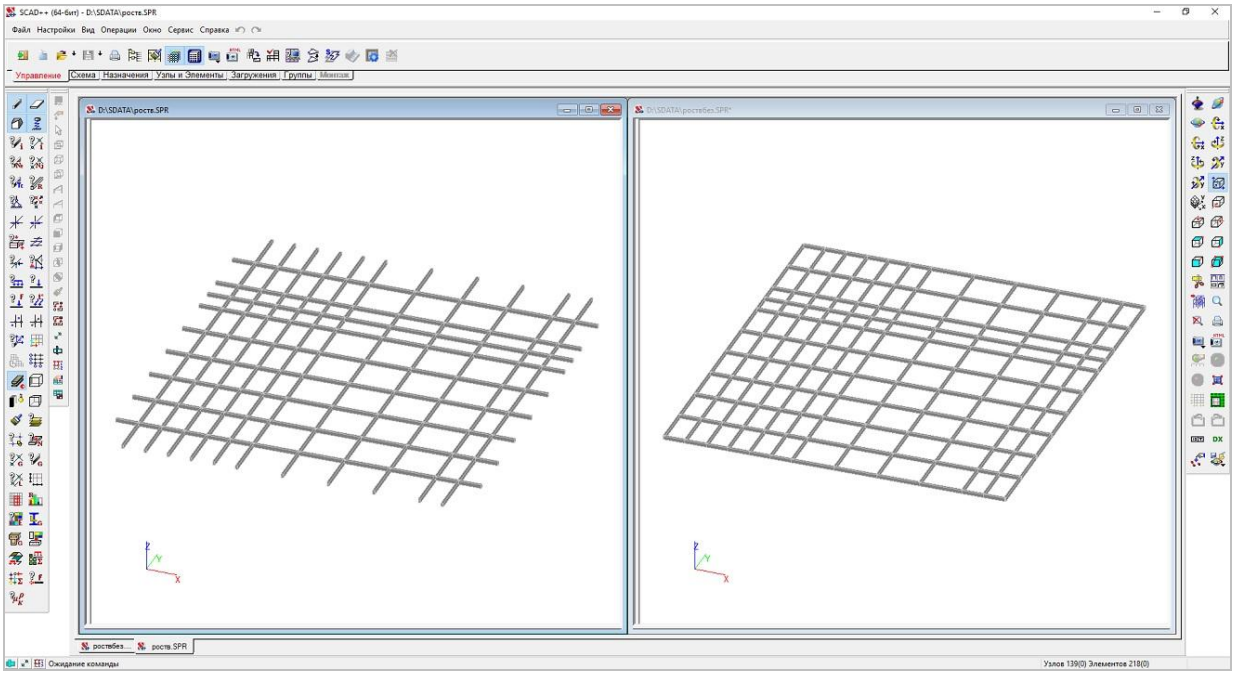


Рис. 5.4-2. *Расчетные схемы открытого и закрытого по контуру балочного ростверка*

При формировании схемы балочного ростверка предусмотрена возможность создания схем двух конфигураций — открытой по контуру и замкнутой (рис. 5.4-2). Выбор конфигурации схемы выполняется указанием курсора на пиктограмму с изображением соответствующего ростверка.

## 5.5.Формирование прямоугольной сетки конечных элементов на плоскости



С помощью этой операции может быть создана прямоугольная сетка с переменным или постоянным шагом, расположенная в плоскости XOY или XOZ. Ввод параметров сетки выполняется в диалоговом окне **Генерация пластинчатой схемы**, изображенном на рис. 5.5-1. Вид схемы и ее положение в пространстве назначаются в одноименной группе с помощью маркеров.

Тип конечным элементам назначается автоматически в зависимости от установленного типа схемы. Если тип конечных элементов отличается от установленного по умолчанию, то он может быть изменен с помощью соответствующей операции, которая вызывается кнопкой **Тип элемента**. Плитам по умолчанию назначается тип 11, балкам-стенкам — 21 (или 27), оболочкам — 41. Если для конкретной конструкции предпочтительным является другой тип элемента, он может быть задан с помощью операции **Назначение типа конечным элементам** в инструментальной панели **Назначение**.

С помощью кнопки **Жесткость** вызывается операция задания жесткостных характеристик элементов.

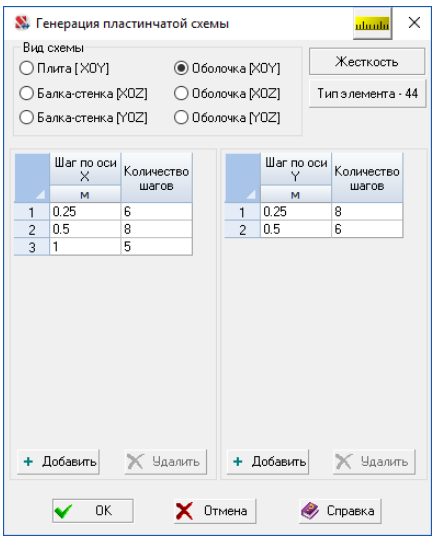



Рис. 5.5-1. *Диалоговое окно* **Генерация пластинчатой схемы**

В качестве примера рассмотрим генерацию плиты, 10×5 м с шагом сетки 1 м по обоим направлениям. Для этого необходимо задать шаг 1 м по направлению X, количество шагов — 10, а также шаг 1 м по направлению Y, количество шагов — 5. После нажатия кнопки **ОК** будет сформирована схема, показанная на рис. 5.5-2,A.

На рис. 5.5-2,B показана схема с переменным шагом сетки конечных элементов, построенной по приведенным ниже данным.

| **Шаг вдоль оси X** | **Количество шагов** | **Шаг вдоль оси Y** | **Количество шагов** |
|---|---|---|---|
| 0.5 | 6 | 0.25 | 8 |
| 0.25 | 8 | 0.5 | 6 |
| 1 | 5 | | |

При назначении разного шага сетки следует помнить, что наиболее качественное решение будет получено при соотношении сторон четырехузловых конечных элементов близким к единице. Идеальным в этом смысле является квадрат.

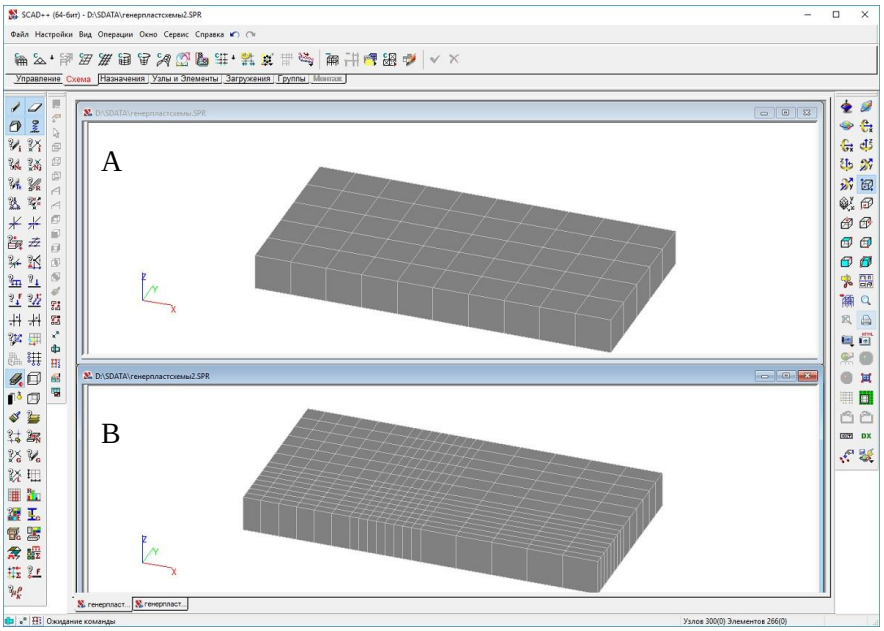



Рис. 5.5-2. *Примеры расчетных схем из прямоугольных конечных элементов*

## 5.6. Поверхности вращения



Эта операция используется для формирования расчетных схем или их фрагментов, моделируемых с помощью стандартных поверхностей вращения. Предусмотрена возможность создания схем в виде цилиндра, конуса, сферы и тора. При этом термин «поверхности» является условным, так как схемы можно создавать и из стержневых элементов, узлы которых лежат на этой поверхности.

Исходные данные, необходимые для выполнения этой операции, задаются в диалоговом окне **Создание поверхности вращения** (рис. 5.6-1) и включают:

- вид поверхности (цилиндр, конус, сфера, тор);
- вид конечных элементов (стержни, пластины) и их тип;
- форму сетки конечных элементов (для стержневых элементов — решетки);
- геометрические размеры;
- параметры разбивки;
- жесткостные характеристики элементов.

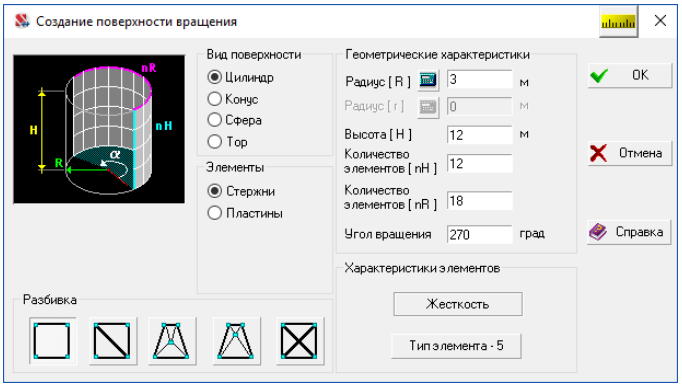



Рис. 5.6-1. *Диалоговое окно* **Создание поверхности вращения**

Жесткостные характеристики элементов (кнопка **Жесткость**) и их тип (кнопка **Тип элемента**) назначаются аналогично одноименным операциям при генерации параметрических прототипов рам.

По умолчанию для стержней принят тип 5, а для пластин — 42 (треугольники) или 44 (четырехугольники).

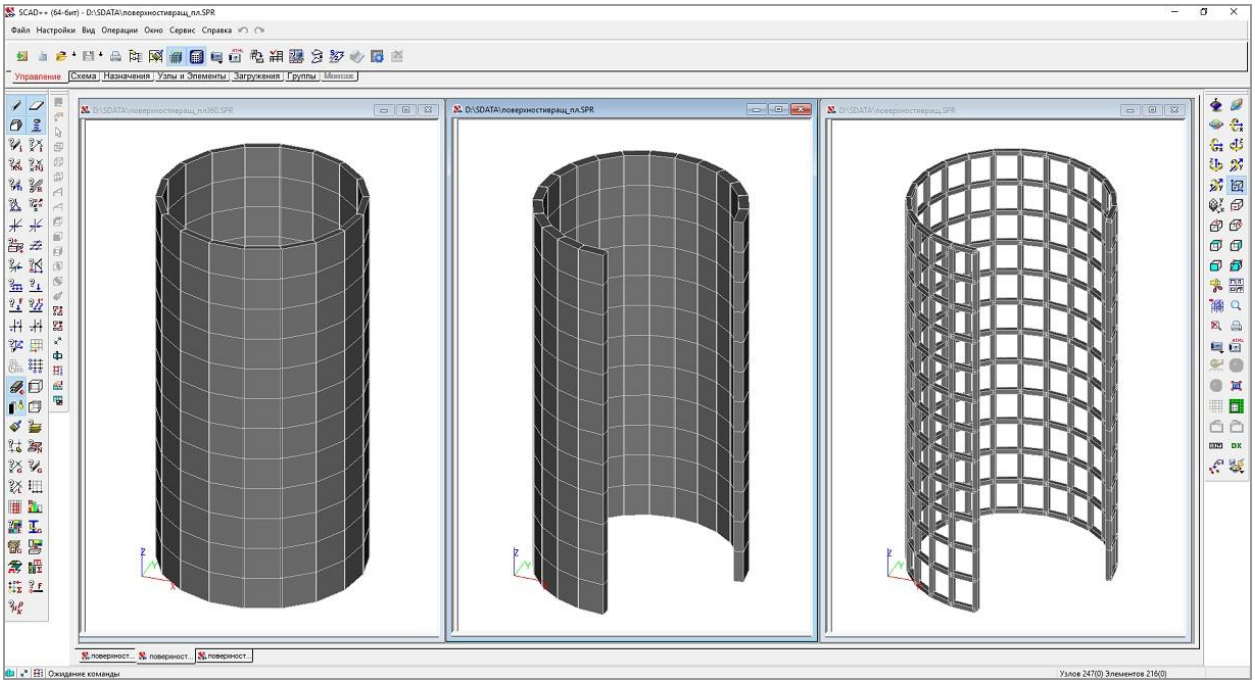


Рис. 5.6-2. *Расчетные схемы цилиндра из элементов оболочки и стержней*

Если угол вращения меньше 360°, то формируется незамкнутая поверхность. Кроме того, расчетные схемы в виде цилиндра, конуса или сферы могут быть усеченными.

При формировании поверхности вращения рекомендуется следующий порядок выполнения операций:

- выбрать вид поверхности;
- выбрать вид элементов схемы;
- назначить тип разбивки;
- ввести геометрические характеристики;
- назначить жесткостные характеристики элементов (этот шаг целесообразно выполнять, если все или большинство элементов имеют одинаковые характеристики);
- нажать кнопку **ОК**.

Примеры различных вариантов расчетных схем цилиндра приведены на рис. 5.6-2.

В тех случаях, когда при описании цилиндра, конуса или сферы определяющим параметром является длина грани (хорды), а не радиус поверхности, предусмотрена операция вычисления радиуса как функции от количества граней и длины хорды. Для вычисления радиуса следует:

- задать количество граней (nR — количество элементов в основании цилиндра или конуса, а для сферы — по экватору);
- вызвать диалоговое окно **Вычисление радиуса по хорде** —  , (кнопка вызова расположена слева от поля ввода радиуса);
- ввести длину хорды в соответствующем поле ввода этого окна (рис. 5.6-3) и нажать кнопку **Вычислить** (вычисленное значение радиуса поверхности вращения будет показано в информационном окне **Радиус**);
- нажать кнопку **Применить**, после чего окно закрывается, а результат автоматически переносится в соответствующее поле ввода окна **Создание поверхности вращения**.

Например, для формирования расчетной схемы трехгранной (nR = 3) пирамиды с длиной грани у основания — 4 м и высотой — 4 м можно воспользоваться приведенным выше приемом (рис. 5.6-4).

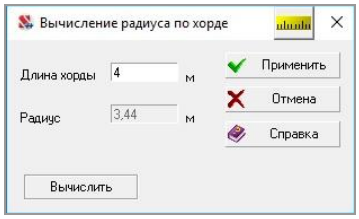



Рис. 5.6-3. *Диалоговое окно* **Вычисление радиуса по хорде**

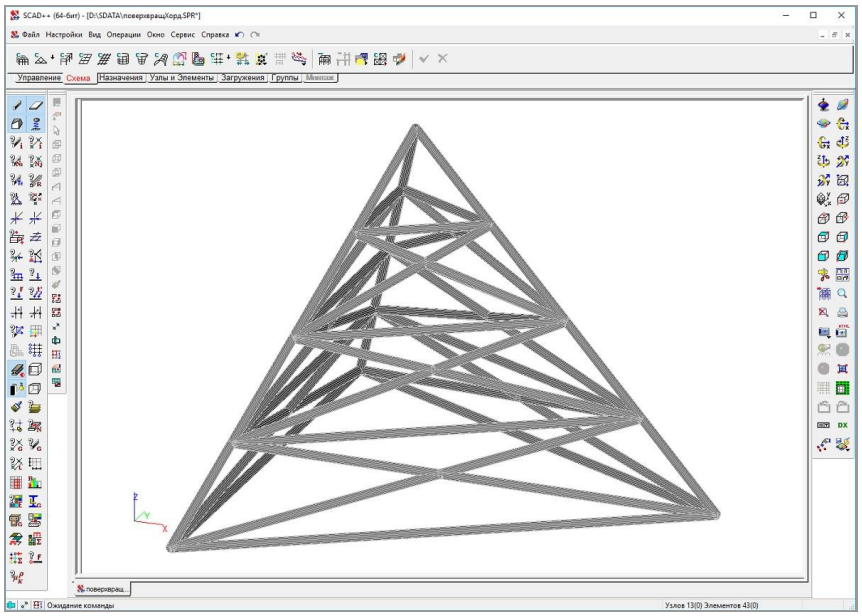
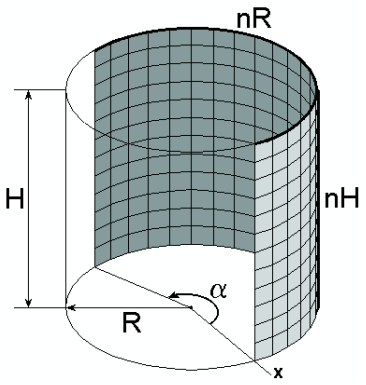


Рис. 5.6-4. *Расчетная схема трехгранной пирамиды*

## Описание параметрических прототипов поверхностей вращения




### *Цилиндр*

При формировании цилиндра задаются следующие параметры:

**R —** радиус цилиндра;

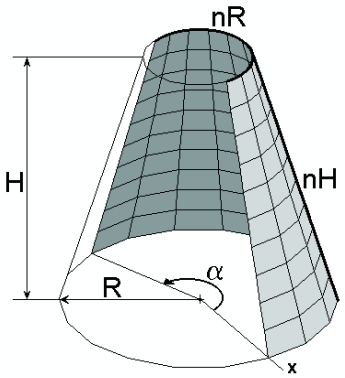
**H —** высота цилиндра;

**nH —** количество элементов по высоте цилиндра;

**nR —** то же, в основании цилиндра;

**Угол вращения (α) —** центральный угол в градусах ($0° < \alpha \le 360°$). Если угол вращения меньше 360°, то формируется незамкнутая поверхность.

Для цилиндра может быть выбрана любая форма разбивки сетки или решетки из предлагаемых в окне **Создание поверхности вращения**. Примеры расчетных схем цилиндра приведены на рис. 5.6-2.




### Конус

Конус может быть полным или усеченным. В случае формирования усеченного конуса r > 0. При формировании конуса задаются следующие параметры:

**R** — радиус основания конуса;

**r** — радиус вершины усеченного конуса;

**H** — высота конуса;

**nH** — количество элементов по высоте конуса;

**nR** — то же, в основании конуса;

**Угол вращения** (α) — центральный угол в градусах (0° < α ≤ 360°). Если угол вращения меньше 360°, то формируется незамкнутая поверхность.

Для конуса может быть выбрана любая форма разбивки сетки или решетки из предлагаемых в окне **Создание поверхности вращения**. Примеры расчетных схем конуса приведены на рис. 5.6-5.

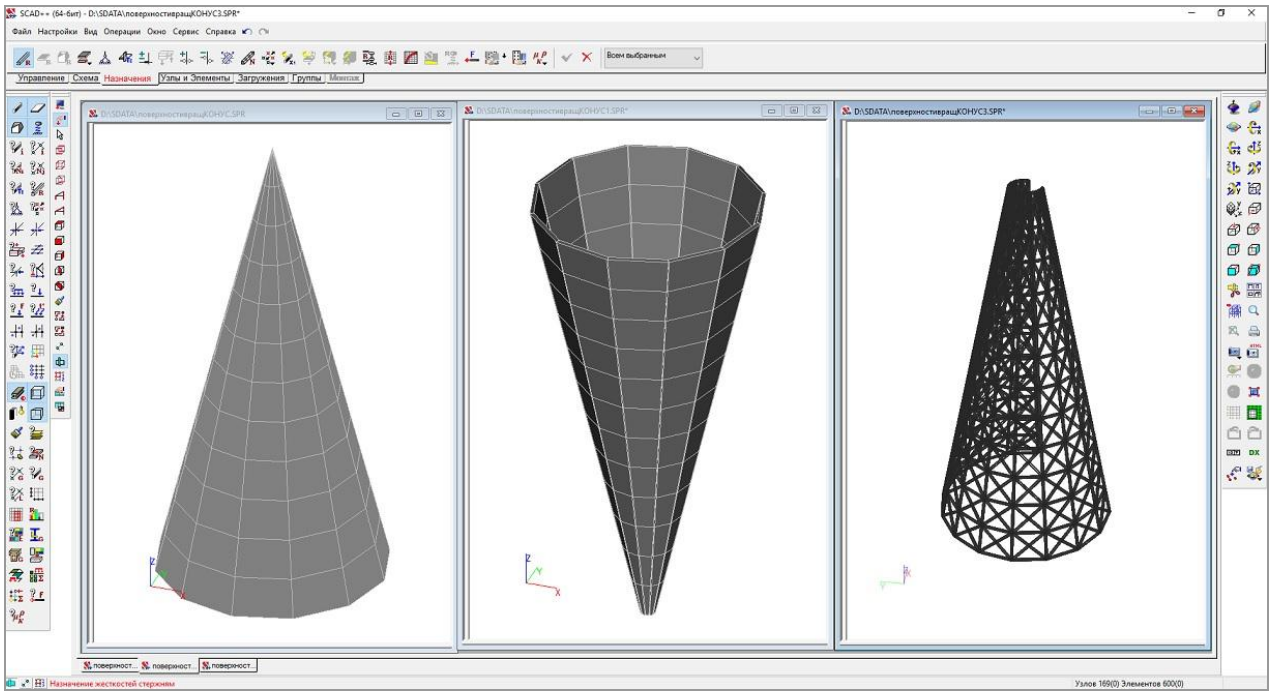
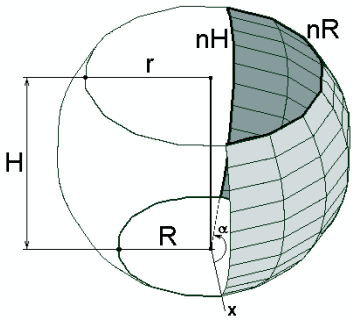


Рис. 5.6-5. *Расчетные схемы конуса из элементов оболочки и стержней*




### *Сфера*

При формировании сферы задаются следующие параметры:

**R —** радиус нижней секущей плоскости;

**r —** то же, верхней;

**H —** расстояние между верхней и нижней секущими плоскостями;

**nH —** количество элементов по высоте сферы;

**nR —** то же, по экватору сферы;

**Угол вращения (α)** — центральный угол в градусах ($0° < \alpha \le 360°$). Если угол вращения меньше 360°, то формируется незамкнутая поверхность. Для формирования полной сферы значения радиусов секущих плоскостей задаются равными нулю, а высота **H** должна равняться диаметру сферы.

Для сферы может быть выбрана любая форма разбивки сетки или решетки из предлагаемых в окне **Создание поверхности вращения**. Примеры расчетных схем сферы приведены на рис. 5.6-6.

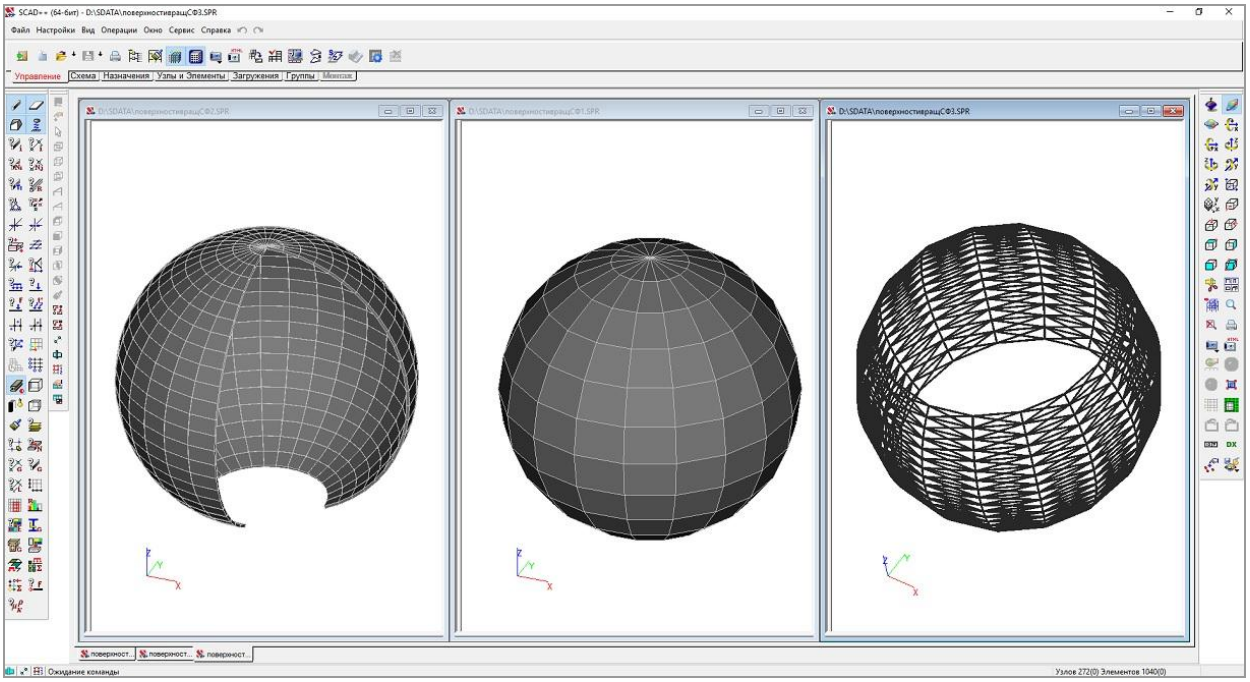
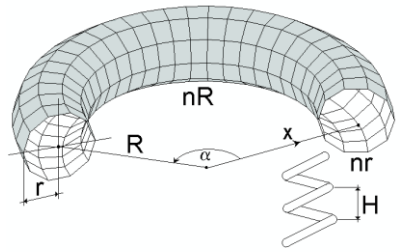


Рис. 5.6-6. *Расчетные схемы сферы из элементов оболочки и стержней*




### Тор

При формировании тора задаются следующие данные:

**R** — радиус тора, измеряемый от центра вращения до оси, проходящей через центр сечения тора;

**r** — радиус сечения;

**H** — шаг спирали;

**nr** — количество элементов в сечении тора;

**nR** — то же, по длине тора;

**Угол вращения (α)** — центральный угол в градусах.

При $\alpha > 360°$ и $H > 0$ формируется (рис. 5.6-7) спираль.

При формировании спирали из пластинчатых элементов существует ограничение на выбор формы элементов. В этом случае, например, нельзя использовать четырехузловые элементы, так как возможно появление неплоских элементов. Блокировка недопустимых форм сетки выполняется автоматически. Примеры расчетных схем тора приведены на рис. 5.6-7.

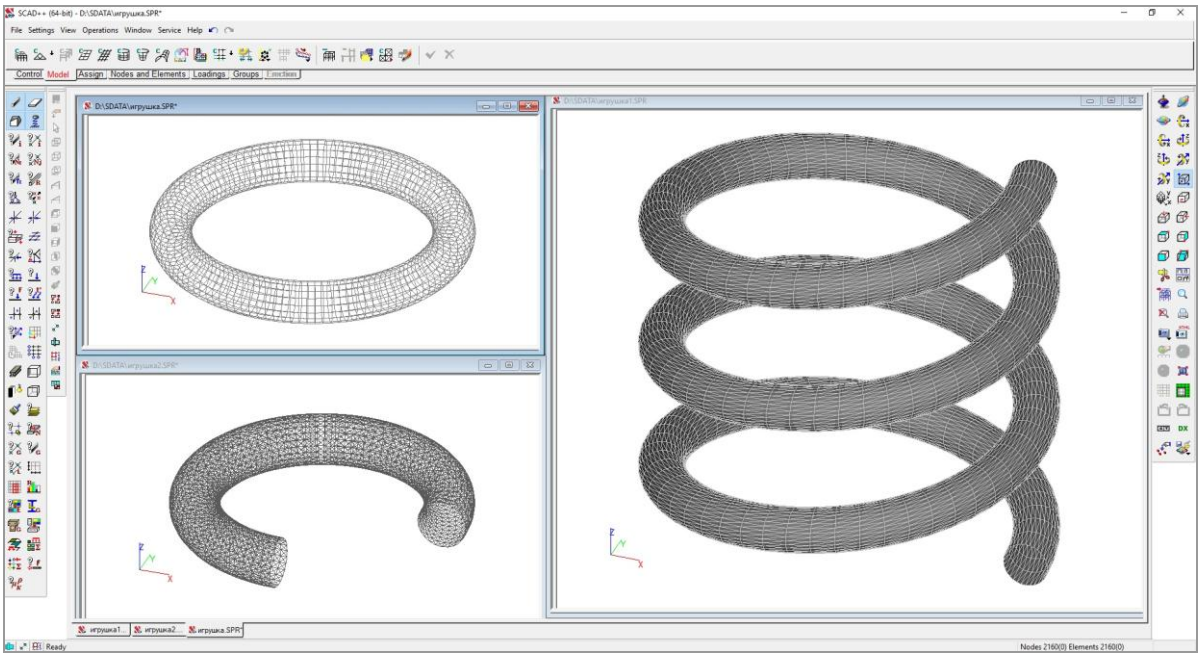


Рис. 5.6-7. *Расчетные схемы тора из элементов оболочки и стержней*

## 5.7. Формирование поверхности вращения, заданной аналитически

 — Создание поверхности вращения по заданной формуле.

Эта операция используется для формирования поверхностей вращения, заданных аналитически. Данные для выполнения операции вводятся в диалоговом окне **Формирование поверхности вращения** (рис. 5.7-1).

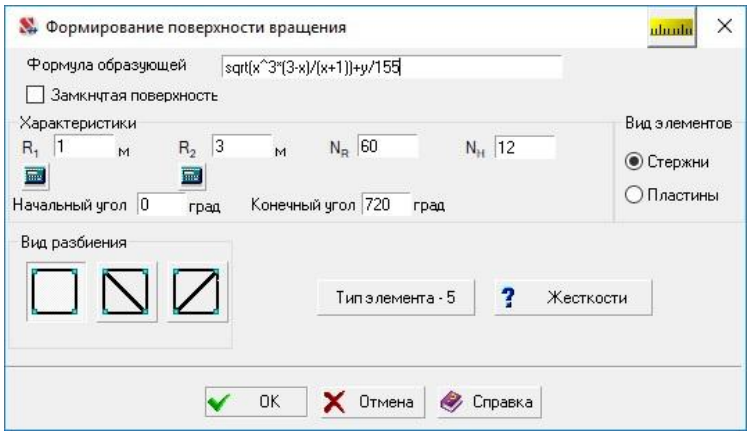
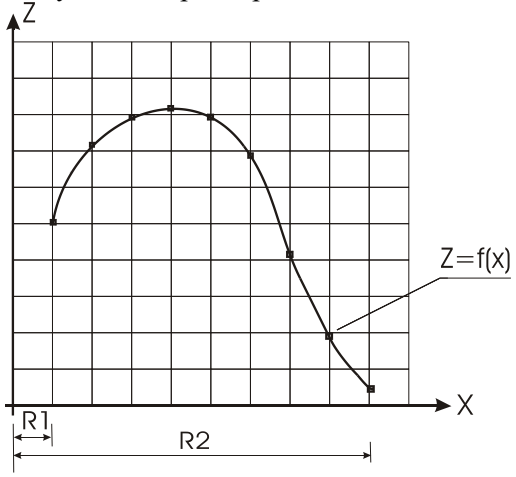



Рис. 5.7-1. *Диалоговое окно* **Формирование поверхности вращения**

Операция позволяет сформировать замкнутые, разомкнутые и спиралевидные поверхности из стержневых элементов или элементов оболочки, полученные в результате движения образующей z = *f*(x) по дуге окружности.

Для формирования замкнутой поверхности (активен одноименный маркер) задаются следующие параметры:




**$R_1$** — радиус начальной окружности (расстояние от начала образующей до оси Z);
**$R_2$** — радиус конечной окружности (расстояние от конца образующей до оси Z);
**$N_r$** — количество элементов поверхности вращения по дуге окружности;
**$N_h$** — количество элементов поверхности вращения вдоль образующей.

Существует ограничение, касающееся использования сеток четырехузловых элементов для схем из элементов оболочки, связанное с возможным возникновением неплоских элементов.

В процессе задания параметров схемы могут быть назначены типы элементов и их жесткости. *По умолчанию* для стержней принят тип 5, а для пластин — 42 (треугольники) или 44 (четырехугольники).

На рисунке 5.7-2,А приведен пример замкнутой поверхности, полученной путем задания образующей

$$z = \sqrt{x^3 (3 - x)/(x + 1)},$$

при активной опции **Замкнутая поверхность** и следующих значениях параметров: $R_1$ = 1 м; $R_2$ = 3 м; $N_r$ = 30; $N_h$ = 20.

Для получения незамкнутых поверхностей дополнительно следует задать значения начального и конечного углов дуги. Так, для начального и конечного углов 0° и 270° соответственно будет получена поверхность, изображенная на рис. 5.7-2,В.

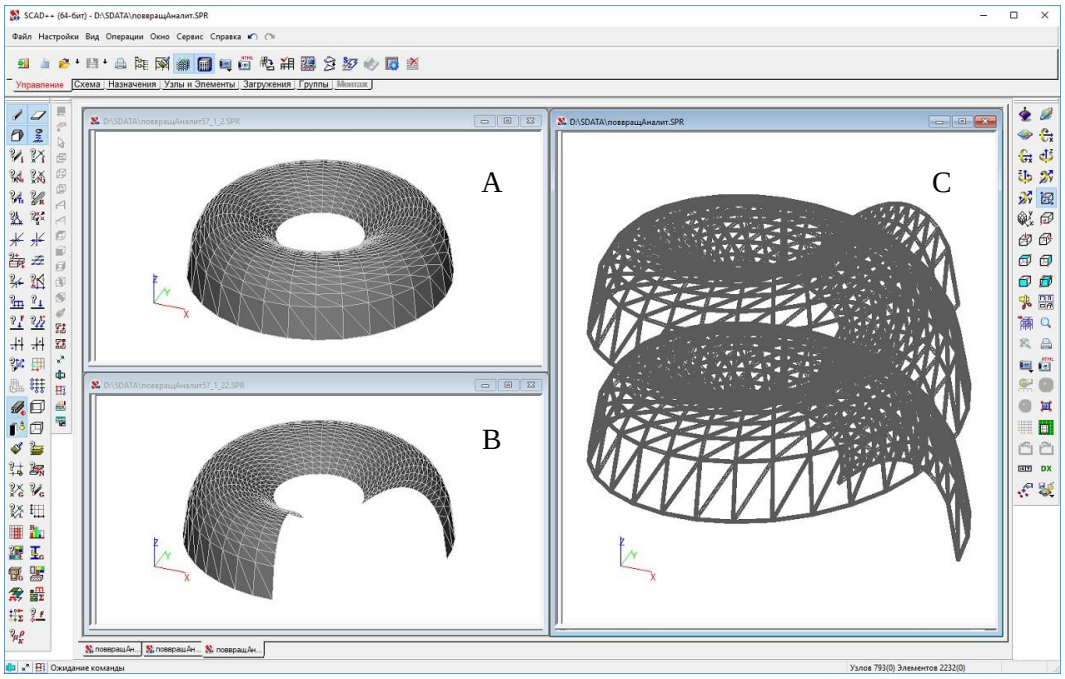



Рис. 5.7-2.

И, наконец, для получения спиралевидной поверхности в формулу необходимо ввести вторую переменную — Y, изменение которой описывает процесс «закручивания» спирали, как функции угла. Например, дополнив формулу второй переменной — y/155,

$$z = \sqrt{\left(x^3\left(3-x\right)\right)/\left(x+1\right)} + y/155$$

при значениях начального и конечного углов 0° и 720° соответственно, получим новую схему (рис. 5.7-2,C). Здесь количество элементов по дуге $N_R$ = 60 (использована стержневая модель).

В тех случаях, когда определяющим параметром является длина грани (хорды), а не радиус поверхности, предусмотрена операция вычисления радиуса как функции от количества граней ($N_R$) и длины хорды. Для вычисления радиуса следует:

- задать количество граней ($N_R$ — количество элементов по дуге окружности);
- вызвать диалоговое окно **Вычисление радиуса по хорде** —  ;
- ввести длину хорды в соответствующем поле ввода этого окна и нажать кнопку **Вычислить** (вычисленное значение радиуса поверхности вращения будет показано в информационном окне **Радиус**);
- нажать кнопку **Применить**, после чего окно закрывается, а результат автоматически переносится в соответствующее поле ввода окна **Формирование поверхности вращения**.

## Правила ввода математических формул

При вводе математических формул следует соблюдать следующие правила:

- наименования функций вводить строчными буквами латинского алфавита;
- в качестве разделителя дробной и целой частей числа использовать точку;
- в качестве аргументов использовать латинские буквы **x** и **y**;
- арифметические операции задавать символами +, –, *, /, возведение в степень — ^ (например, $x^3$ записывается как x^3).

  При записи формул можно использовать следующие функции:

  **floor** — наибольшее целое, не превышающее заданное;
  **ceil** — наименьшее целое, превышающее заданное;
  **tan** — тангенс;
  **tanh** — тангенс гиперболический;
  **sin** — синус;
  **sinh** — синус гиперболический;

**cos** — косинус;
**asin** — арксинус;
**acos** — арккосинус;
**atan** — арктангенс;
**exp** — экспонента;
**cosh** — косинус гиперболический;
**log** — натуральный логарифм;
**log10** — десятичный логарифм;
**abs** — абсолютное значение;
**sqrt** — корень квадратный.

### Пример. Отражатель радиотелескопа

Отражатель радиотелескопа (рис. 5.7-3,A) в виде параболоида вращения диаметром 60 м и со стрелкой 6 м в цилиндрической системе координат задан формулой образующей $z=x^2/150$.

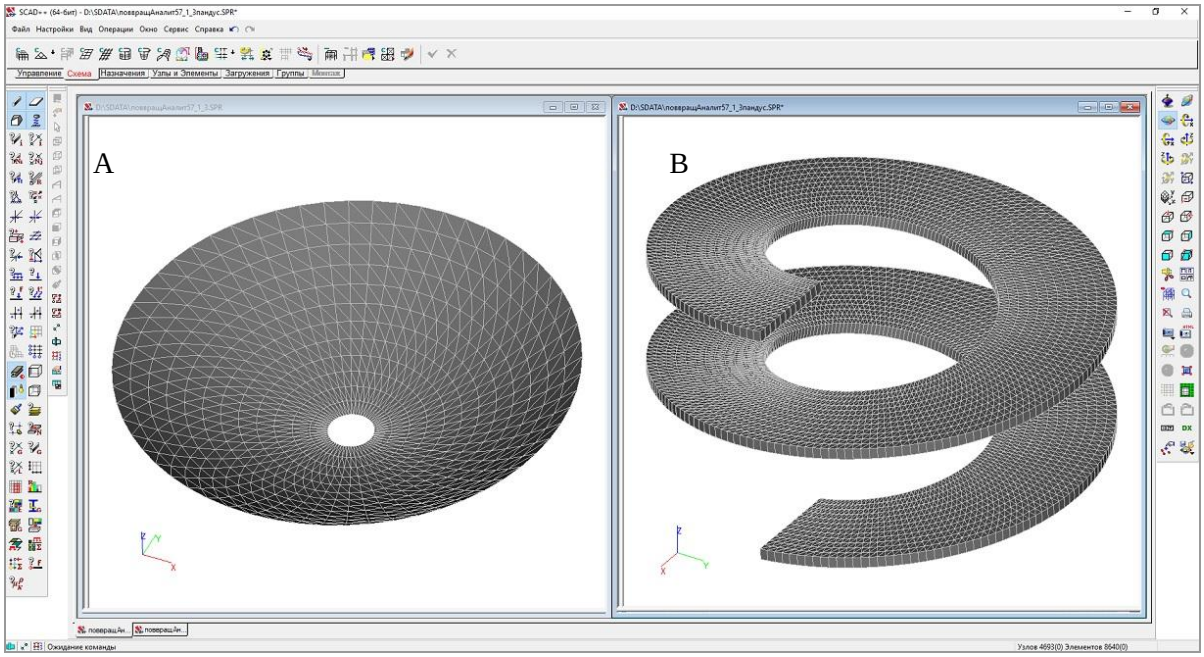



Рис. 5.7-3. *Примеры расчетных схем поверхностей вращения*

### Пример. Винтовой пандус

В случае винтового пандуса (рис. 5.7-3,B) образующая строится по формуле H / 360 * *y*, где H — высота подъема лестницы за один виток (360° градусов).

**Характеристики винтового пандуса** — формула 3.2 / 360**y* (высота подъема за один виток 3.2 м), внутренний радиус 3 м, внешний радиус 6 м, количество элементов по длине — 360, количество элементов по ширине — 12, начальный угол 0°, конечный угол 720º (два полных витка).

## 5.8. Формирование поверхности, заданной аналитически

 — Создание поверхности по заданной формуле

Эта операция позволяет сформировать расчетную схему в виде аналитически заданной поверхности, которая получена путем табулирования функции двух переменных $z = f(x,y)$ с интервалом и шагом, назначенными для каждой переменной. Данные для выполнения операции вводятся на странице **Поверхность по формуле** двухстраничного диалогового окна **Аналитически задаваемые поверхности** (рис. 5.8-1).

Схема может быть сформирована как из стержневых, так и из пластинчатых элементов. Кроме формулы поверхности (правила ввода математических формул приведены выше) необходимо задать следующие характеристики:

**$X_{нач}$** — начальное значение X;
**$X_{кон}$** — конечное значение X;
**$N_x$** — количество элементов по направлению X;

**$Y_{нач}$** — начальное значение Y;
**$Y_{кон}$** — конечное значение Y;
**$N_y$** — количество элементов по направлению Y.

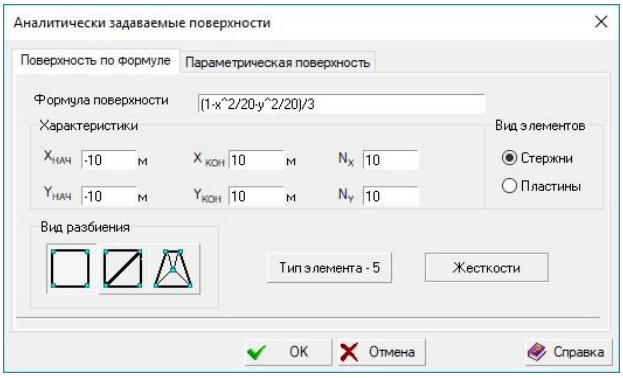



Рис. 5.8-1. *Диалоговое окно* **Аналитически задаваемые поверхности**

Кроме того, на странице назначаются вид элементов схемы (стержни или пластины) и форма разбиения поверхности. Если тип конечных элементов отличается от установленного по умолчанию, то он может быть изменен с помощью соответствующей операции, которая вызывается кнопкой **Тип элемента**. По умолчанию приняты: тип элемента 5 — для стержневых элементов и типы 44 (четырехузловой) или 42 (трехузловой) — для оболочек, в зависимости от выбранной формы разбиения. С помощью кнопки **Жесткости** вызывается операция задания жесткостных характеристик элементов.

### Пример. Оболочка (параболоид вращения)

Схема описана зависимостью $z = (1 - x^2/20 - y^2/20)/2$ при следующих значениях характеристик: $X_{нач} = -10$ м; $X_{кон} = 10$ м; $N_x = 10$; $Y_{нач} = -10$ м; $Y_{кон} = 10$ м; $N_y = 10$. Полученные в результате расчетные схемы (слева из стержневых элементов, справа из элементов оболочки) изображены на рис. 5.8-2.

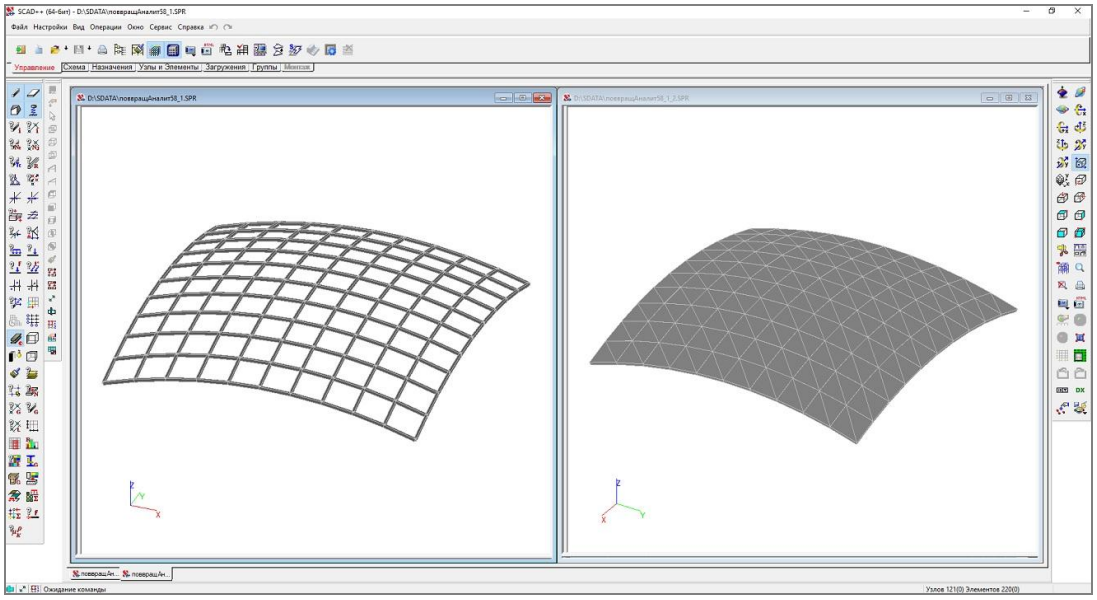


Рис. 5.8-2. *Пример расчетной схемы оболочки*

## 5.9. Формирование параметрических поверхностей

Кроме операции формирования аналитических поверхностей (по заданной формуле) в программе реализована операция генерации параметрических поверхностей. Исходные данные для этой

операции задаются на странице **Параметрическая поверхность** диалогового окна **Аналитически задаваемые поверхности** (рис. 5.9-1).

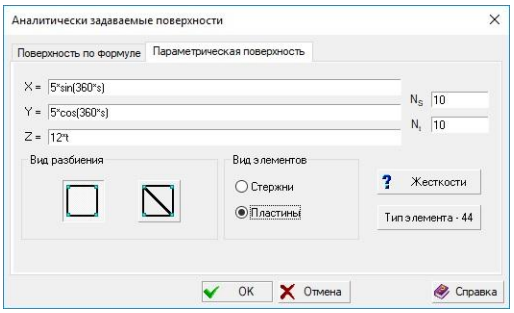



Рис. 5.9-1. *Страница* **Параметрическая поверхность** *диалогового окна* **Аналитически задаваемые поверхности**

Рассматриваются зависимости $x = f(s,t)$, $y = f(s,t)$, $z = f(s,t)$. Принято, что каждая из переменных $s$ и $t$ изменяется в интервале [0, 1], причем переменная $s$ последовательно принимает значения 0, $1/N_s$, $2/N_s$, … 1, а переменная $t$ — соответственно 0, $1/N_t$, $2/N_t$, … 1, где $N_s$ и $N_t$ — количество шагов табулирования соответствующих переменных.

Например, формулы, описывающие поверхность цилиндра с радиусом равным 5 и высотой 12, будут иметь вид:

$x = 5 \sin\alpha$;
$y = 5 \cos\alpha$;
$z = 12\ h$

и должны быть записаны в соответствующих полях ввода на странице **Параметрическая поверхность** в виде:

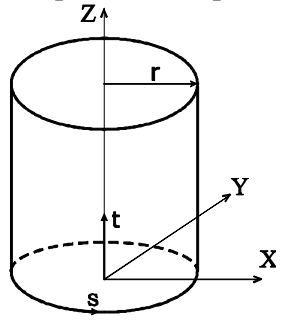
$x = 5*\sin(360*s)$;
$y = 5*\cos(360*s)$;
$z = 12*t$.

Кроме того, на странице задаются значения $N_s$ и $N_t$. а также назначаются вид элементов (стержни или пластины) и форма разбиения поверхности. Если тип конечных элементов отличается от установленного по умолчанию, то он может быть назначен с помощью соответствующей операции, которая вызывается кнопкой **Тип элемента**. По умолчанию приняты: тип элемента 5 — для стержневых элементов и типы 44 (четырехузловой) или 42 (трехузловой) — для оболочек, в зависимости от выбранной формы разбиения. С помощью кнопки **Жесткости** вызывается операция задания жесткостных характеристик элементов.

***Обратите внимание:*** **если в формуле участвуют тригонометрические или обратные тригонометрические функции, то следует учесть, что их аргументы (или вычисленные значения) должны быть в градусах.**

## Примеры формирования расчетных моделей с использованием операции генерации параметрических поверхностей

### Пример 1. Цилиндр




Исходные данные:

Радиус $r$ = 3 м;

Высота $h$ = 12 м;

Количество шагов табуляции переменной $s$ — $N_s$ = 10;

Количество шагов табуляции переменной $t$ — $N_t$ = 10;

Формулы для формирования схемы будут иметь следующий вид:

| Переменная | Формула | Запись |
|---|---|---|
| $x$ | $r\cos(s)$ | 3*cos(360*s) |
| $y$ | $r\sin(s)$ | 3*sin(360*s) |
| $z$ | $t$ | 12*t |

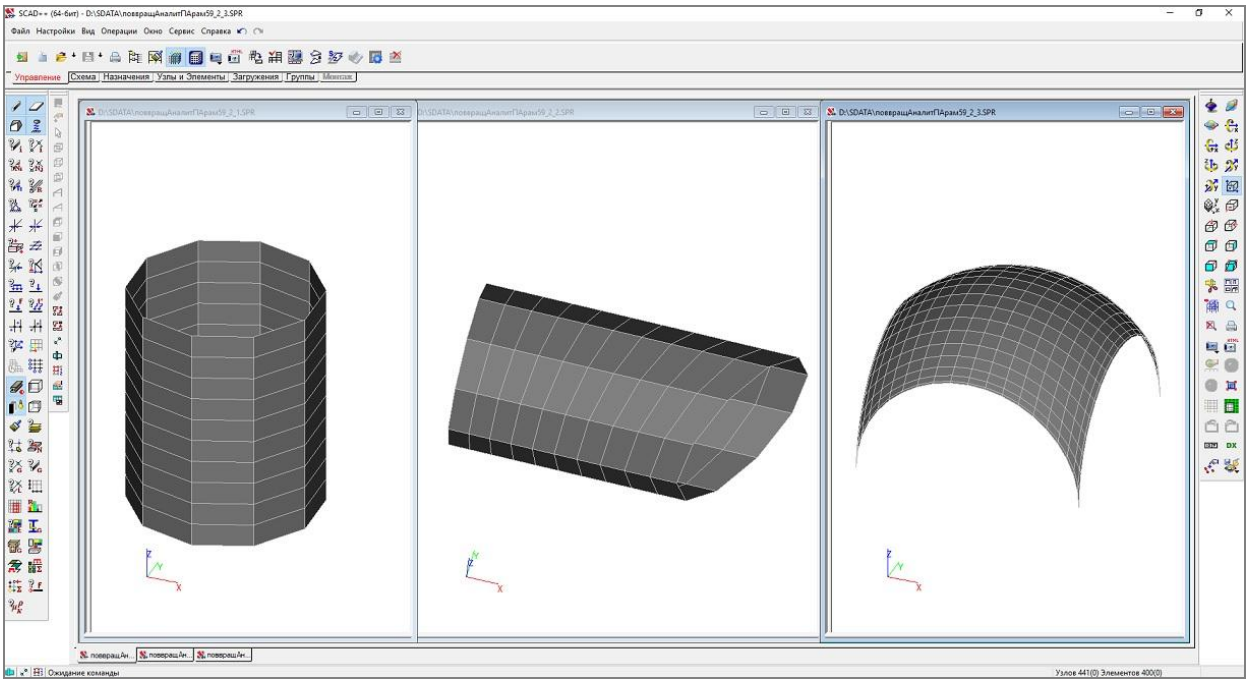
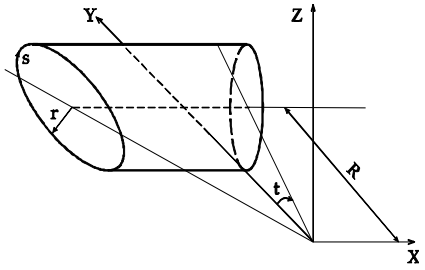


Рис. 5.9-2. *Примеры расчетных схем параметрических поверхностей*

**Пример 2. Усеченный цилиндр**




Исходные данные:

Радиус $r$ = 3м;

Высота $h$ = 12м ($R = h/\mathrm{tg}(30) - r$);

Угол секущей плоскости — $30^0$;

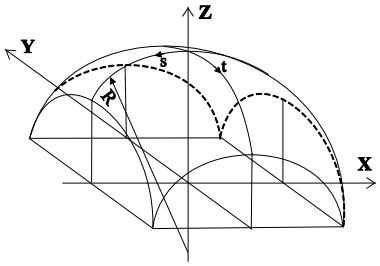
Количество шагов табуляции переменной $s$ — 20;

Количество шагов табуляции переменной $t$ — 10.

Формулы для формирования схемы будут иметь следующий вид:

| Переменная | Формула | Запись |
|---|---|---|
| $x$ | $(R + r\cos(s))\ \mathrm{tg}(t)$ | (12/tan(30)–3+3*cos(360*s))*tan(30*t) |
| $y$ | $R + r\cos(s)$ | 12/tan(30)–3+3*cos(360*s) |
| $z$ | $r\sin(s)$ | 3*sin(360*s) |

**Пример 3. Сферическая поверхность**




Исходные данные:

Радиус $R$ = 10 м;

Количество шагов табуляции переменной $s$ — 20;

Количество шагов табуляции переменной $t$ — 20.

Формулы для формирования схемы будут иметь следующий вид:

| Переменная | Формула | Запись |
|---|---|---|
| $x$ | $R/\sqrt{2}\ \sin(t)$ | 10/sqrt(2)*sin(–90+180*t) |
| $y$ | $R/\sqrt{2}\ \sin(s)$ | 10/sqrt(2)*sin(–90+180*s) |
| $z$ | $R/\sqrt{2}\sqrt{2-\sin^2 t-\sin^2 s}$ | 10/sqrt(2)*sqrt(2–(sin(–90 + 180*t))**2–(sin(–90 + 180*s))**2) |

**При формировании сферической поверхности из элементов оболочек рекомендуется пользоваться разбиением на трехузловые элементы, т.к. в четырехузловых элементах не гарантируется принадлежность узлов элемента одной плоскости.**

## 5.10. Создание стандартной аналитической поверхности



Для аналитических поверхностей, достаточно часто используемых в практике проектирования, предусмотрена возможность генерации соответствующих расчетных моделей без явного ввода формул поверхности. Для этого в диалоговом окне (см. рис. 5.10-1) следует из выпадающего списка выбрать тип поверхности, задать геометрические параметры и параметры генерации конечно-элементной сетки. Для справки в этом окне приводятся формулы поверхности.

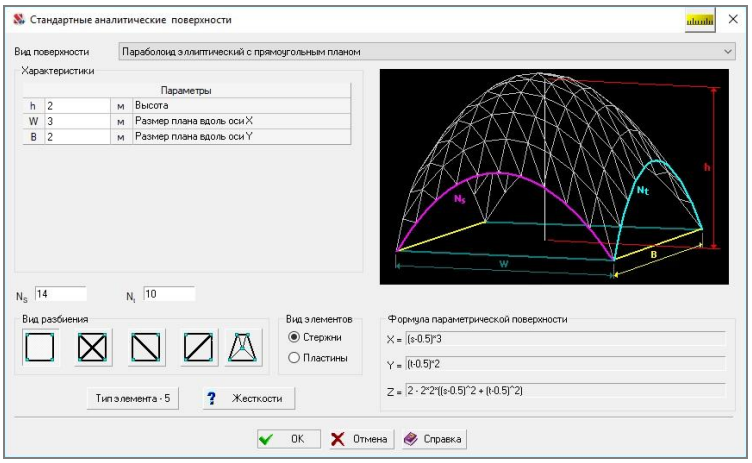
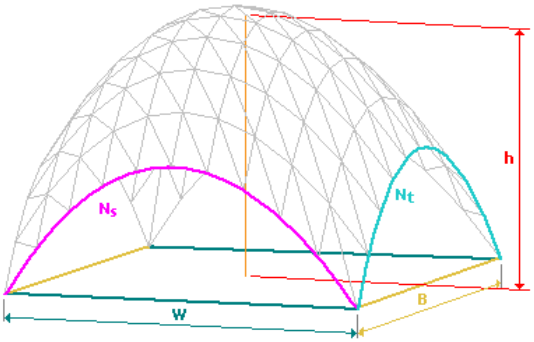
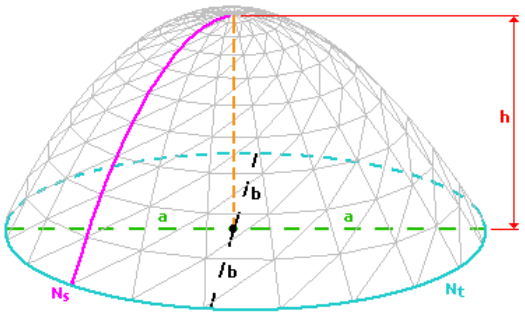



Рис. 5.10-1. *Диалоговое окно* **Стандартные аналитические поверхности**

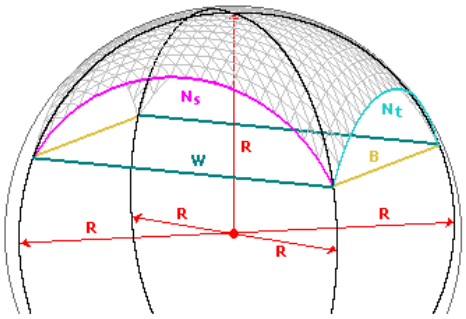
Так же, как в случае создания произвольных аналитических поверхностей, здесь предусмотрена возможность задания типов конечных элементов и их жесткостных характеристик. В программе реализованы следующие типы поверхностей



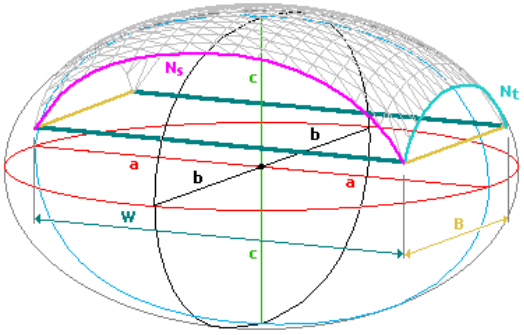

*Параболоид эллиптический с прямоугольным планом*



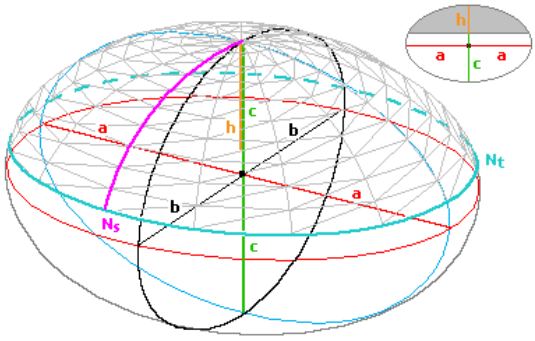

*Параболоид эллиптический с эллиптическим планом*



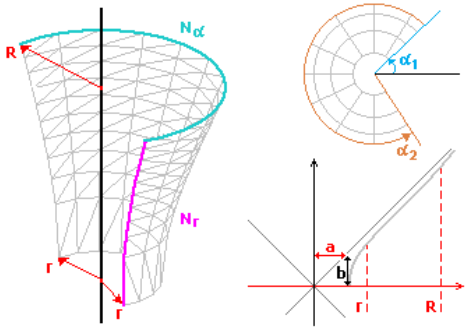

*Сферическая поверхность*



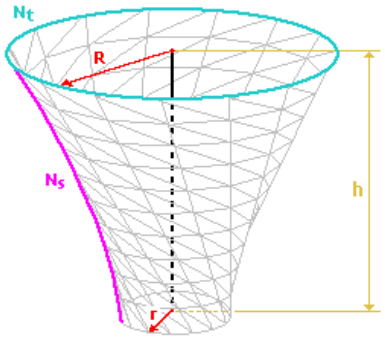

*Эллипсоидная поверхность с прямоугольным планом*



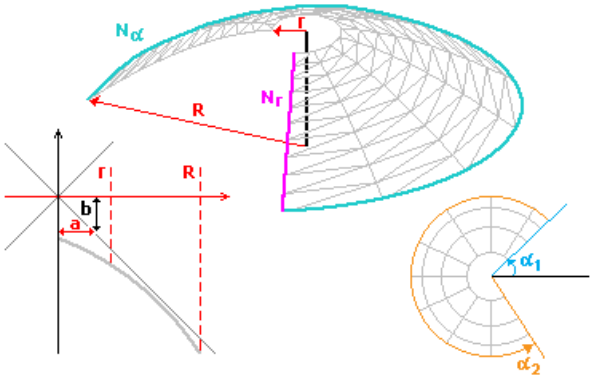

*Эллипсоидная поверхность с эллиптическим планом*



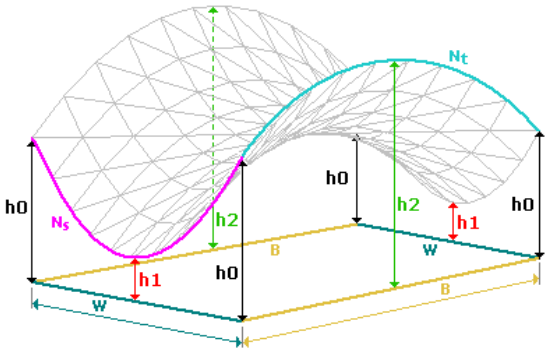

*Гиперболоид вращения, однополостный*



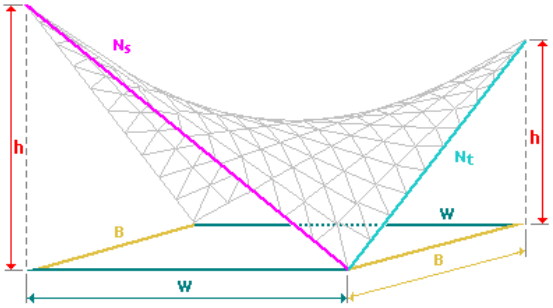

*Гиперболоид вращения, однополостный, параметрическая форма*



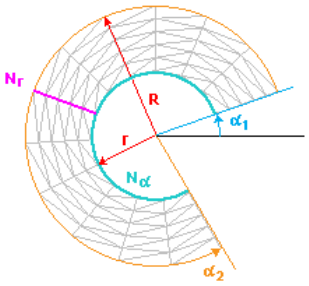

*Гиперболоид вращения, двуполостный, нижняя часть*



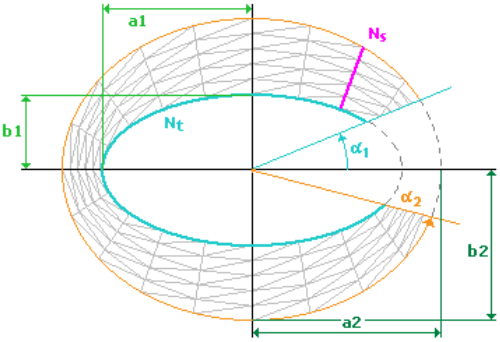

*Параболоид гиперболический, седловидная форма*



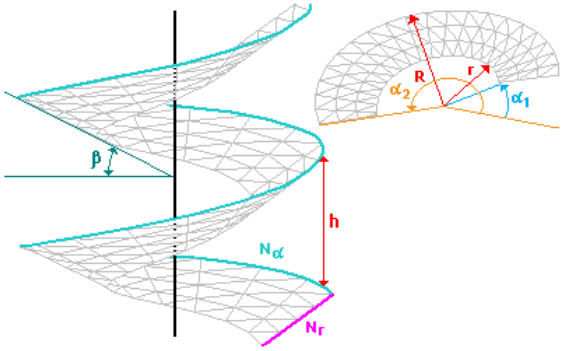

*Параболоид гиперболический, линейчатая форма*



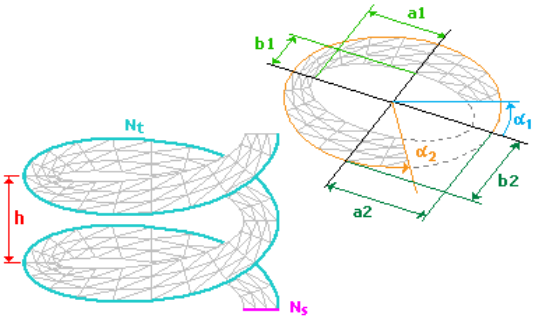

*Кольцо*



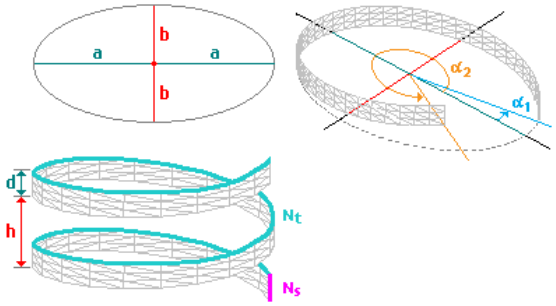

*Кольцо эллиптическое*



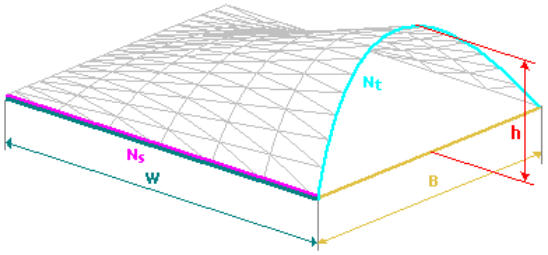

*Геликоид*



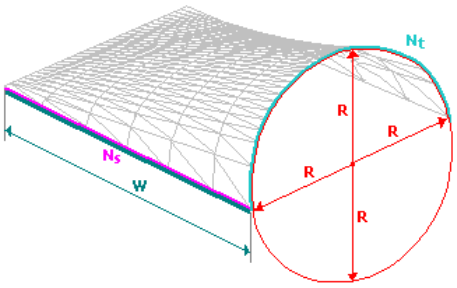

*Геликоид прямой, эллиптический*




*Винтовая полоса, эллиптическая*




*Коноид параболический*




*Коноид с направляющей окружностью*

## 5.11. Создание стандартных конструкций



Для стандартных конструкций (подконструкций), достаточно часто используемых в практике проектирования, предусмотрена возможность генерации соответствующих расчетных моделей. Для этого в диалоговом окне **Стандартные конструкции** (рис. 5.11-1) следует из выпадающего списка

выбрать тип конструкции, задать геометрические параметры и параметры генерации конечно-элементной сетки.

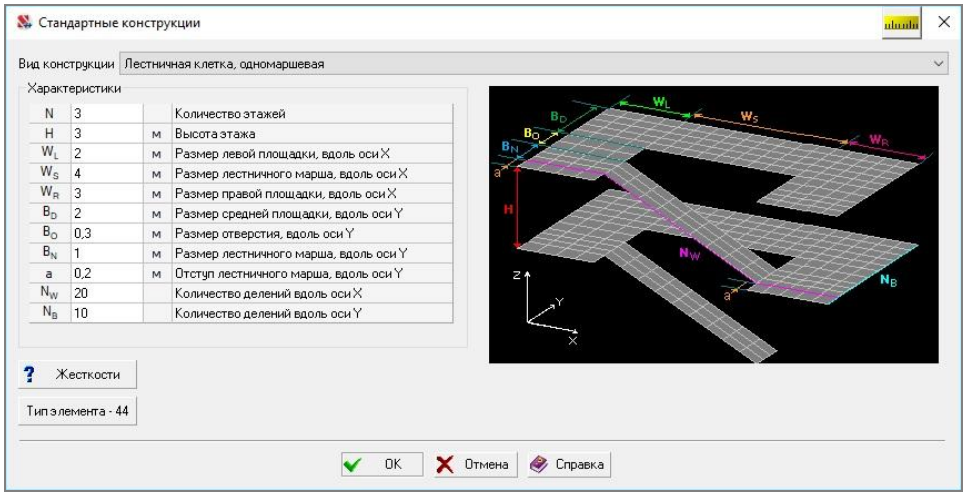
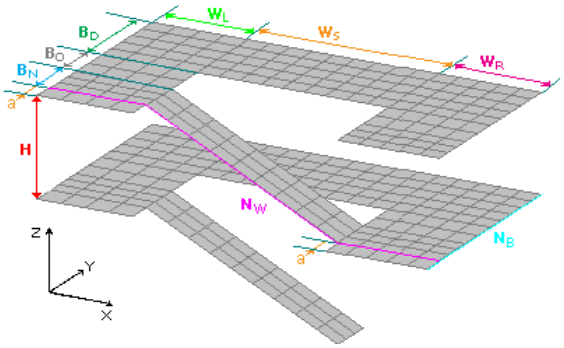


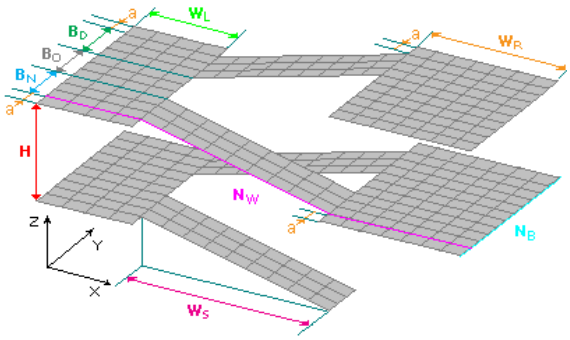

Рис. 5.11-1. *Диалоговое окно* **Стандартные конструкции**

В операции предусмотрена возможность выбора типов конечных элементов и их жесткостных характеристик.

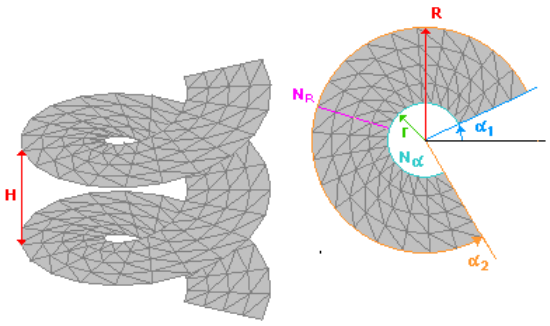
В программе реализованы следующие типы конструкций:



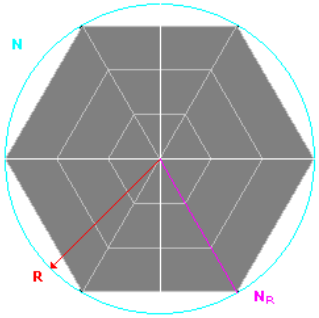
*Лестничная клетка, одномаршевая*



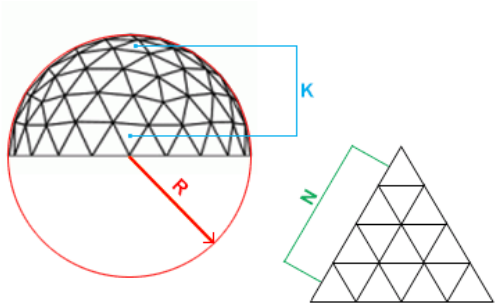
*Лестничная клетка, двухмаршевая*



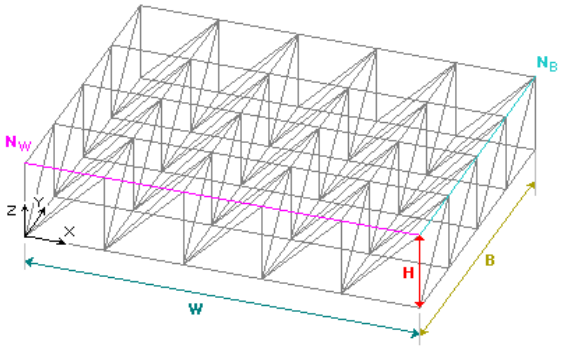
*Лестница винтовая*



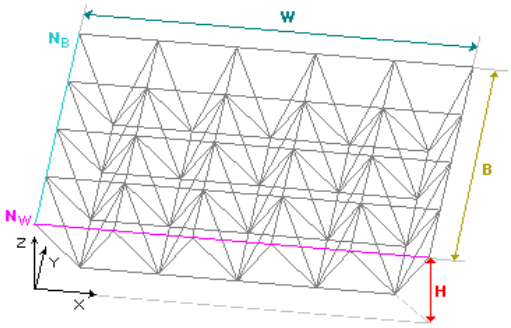
*Правильный многоугольник*



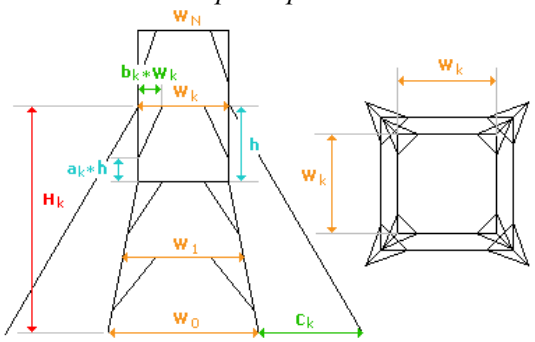

*Геодезический купол*



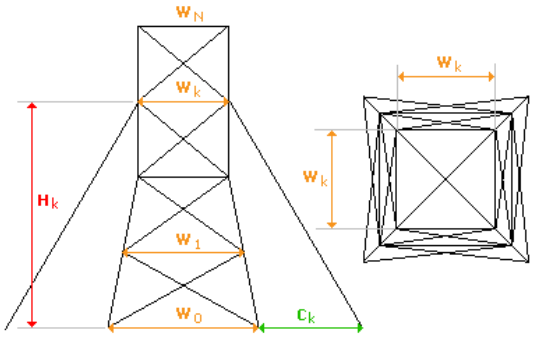

*Ферма-крыша*



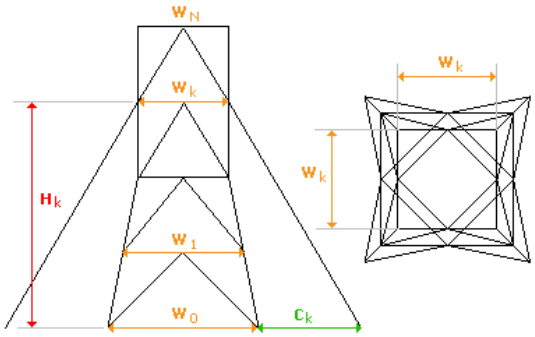

*Ферма-крыша сдвинутая на полшага*



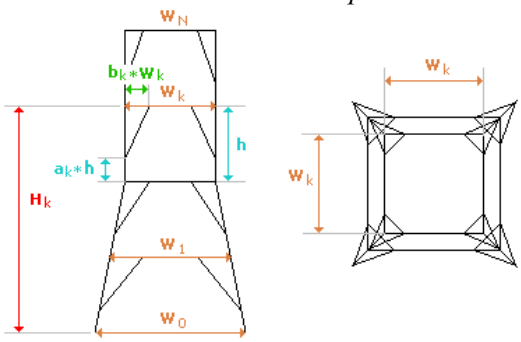

*Мачта с произвольными раскосами*



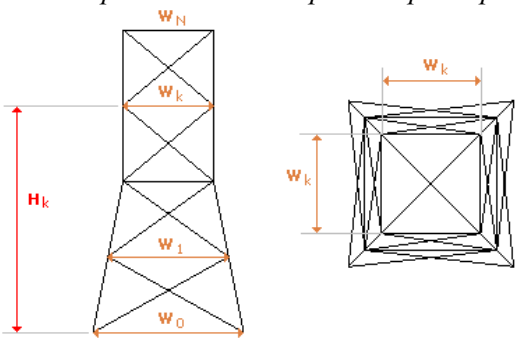

*Мачта с диагональными раскосами*



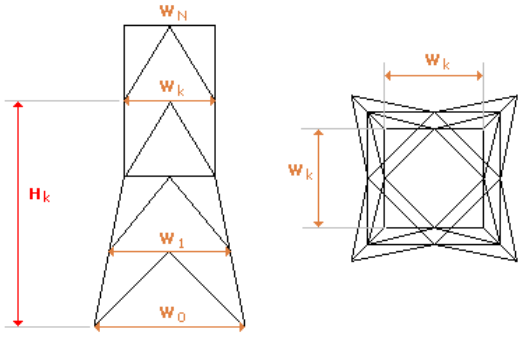

*Мачта с раскосами от середины распорки*



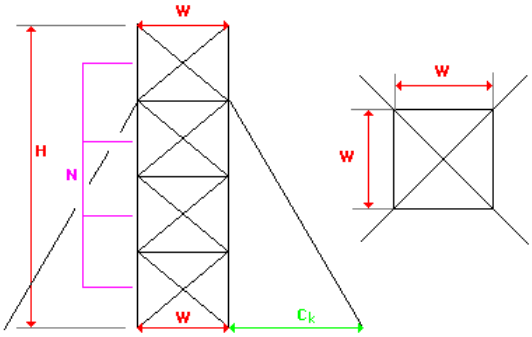

*Башня с произвольными раскосами*



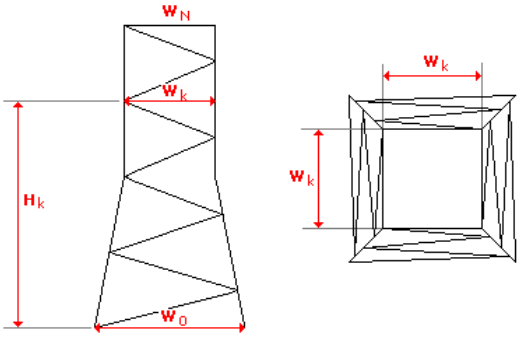

*Башня с диагональными раскосами*



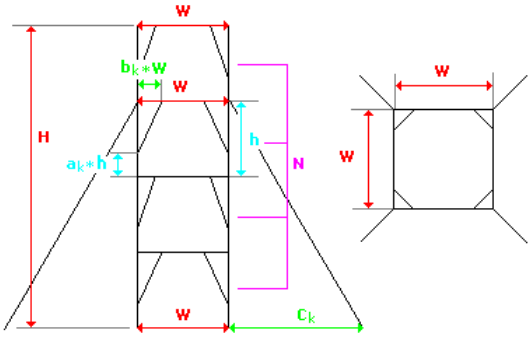

*Башня с раскосами от середины распорки*



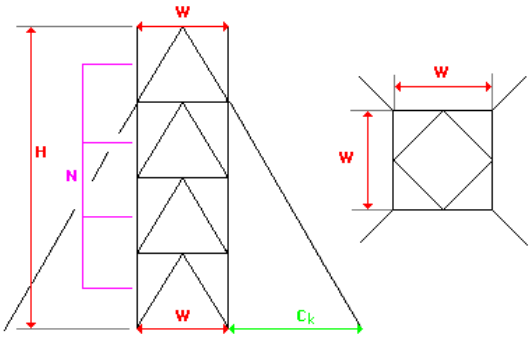

*Мачта с диагональными раскосами (упрощенный ввод)*



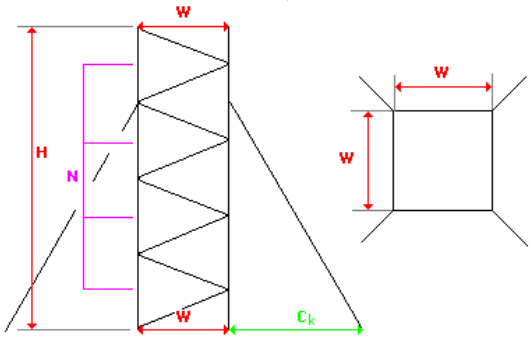

*Мачта с раскосами от середины стойки*



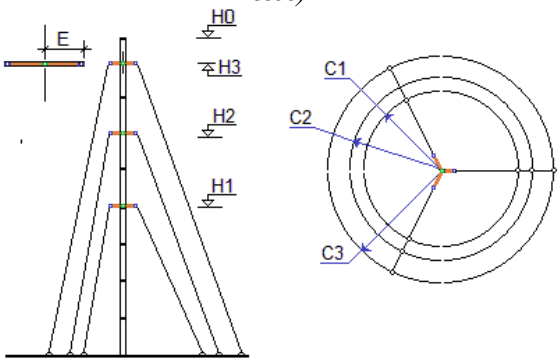

*Мачта с раскосами от середины стойки (упрощенный ввод)*




*Мачта с раскосами от середины распорки (упрощенный ввод)*




*Мачта с произвольными раскосами (упрощенный ввод)*




*Мачта на оттяжках*

В приведенном выше списке конструкций для мачт и башен, помимо общих геометрических параметров, предусмотрена возможность добавления/удаления ярусов сооружения; задания различных жесткостей для элементов, расположенных на различных уровнях и задания связей в опорных узлах (см. рис. 5.11-2).

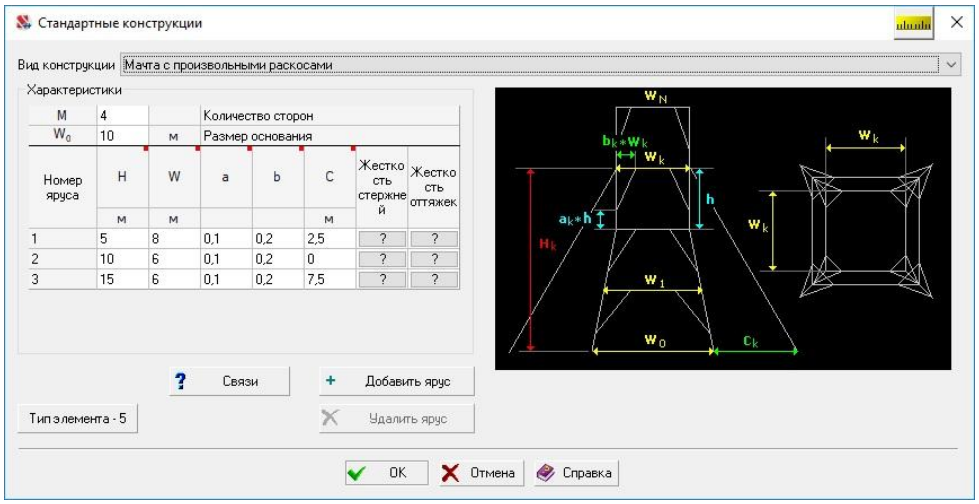



Рис. 5.11-2. *Диалоговое окно* **Стандартные конструкции** *(мачты и башни)*

## 5.12. Формирование произвольной сетки конечных элементов на плоскости



Автоматическая триангуляция замкнутой области произвольной формы на плоскости является одним из наиболее универсальных средств формирования сеток конечных элементов. В комплексе предусмотрена возможность триангуляции как при создании новой схемы, так и триангуляция фрагмента готовой схемы.

### Основные положения

Операция **Генерация сетки произвольной формы на плоскости** вызывается из раздела **Схема** инструментальной панели. Управление триангуляцией выполняется кнопками, которые объединены в инструментальную панель окна задачи и появляются после инициализации триангуляции (рис. 5.12-1).




Рис. 5.12-1. *Инструментальная панель управления триангуляцией*

Назначение кнопок этой панели следующее:

 — Задание контура — ввод внешнего и внутренних контуров, ограничивающих область триангуляции;

 — Запись результатов триангуляции как подсхемы — сохранение результатов триангуляции в виде отдельного проекта;

 — Генерация треугольной сетки конечных элементов на плоскости — назначение параметров и инициализация процесса триангуляции;

 — Улучшение качества триангуляции;

 — Анализ качества триангуляции;

 — Установка результатов триангуляции на место в схеме — присоединение подсхемы, полученной в результате триангуляции, к схеме;

 — Преобразование стержней в контур триангуляции — формирование контура триангуляции из предварительно выбранных стержней;

 — Преобразование выпуклой оболочки отмеченных узлов в контур триангуляции;

 — Сохранение контура триангуляции — назначение имени и запись в проект контура триангуляции;

 — Экспорт контура триангуляции в программу GMSH;

 — Превращение контурных элементов в контур триангуляции — преобразование элементов, сформированных препроцессором **ФОРУМ**, в контуры для последующей триангуляции;

 — Указание узлов сгущения сетки — назначение узлов, в окрестности которых выполняется локальное сгущение сетки;

 — Указание линий сгущения сетки — назначение линий внутри контура триангуляции, вдоль которых выполняется сгущение сетки;

 — Отказ от результатов триангуляции / сброс контура.

Кроме кнопок в рассматриваемой инструментальной панели находится список контуров, заданных в текущем проекте.

Для триангуляции заданной области необходимо выполнить операции в следующей последовательности:

- нажать кнопку **Задание контура**  и обвести «резиновой нитью» опорные узлы внешнего контура (под «опорными» понимаются узлы, лежащие в угловых точках контура);
- повторить предыдущую операцию для всех внутренних контуров;
- нажать кнопку **Генерация треугольной сетки КЭ на плоскости**  и назначить параметры триангуляции в диалоговом окне **Автоматическая триангуляция** (рис. 5.12-5);
- после выхода из диалогового окна нажатием кнопки **ОК** выполняется разбиение заданной области на трехузловые или/и четырехузловые конечные элементы;
- установить область на место в схеме нажатием кнопки  или/и записать ее в виде подсхемы.

После разбиения области триангуляции контур не сбрасывается и можно повторить назначение новых параметров триангуляции и т.д. до тех пор, пока не будет получен удовлетворяющий результат. Контур будет сброшен только после установки области на место в схеме и/или записи ее в виде подсхемы.

### Ввод контура триангуляции



Перед тем как выполнить триангуляцию, необходимо задать контур, ограничивающий область триангуляции. Контур задается с помощью замкнутой ломаной линии, проходящей через заранее введенные опорные узлы. Кроме того, в качестве контура можно использовать стержневые элементы, лежащие на границе области триангуляции. Если область триангуляции содержит внутренние области, в которых триангуляция не выполняется (например, отверстия), то каждая из таких областей должна задаваться с помощью «своего» контура.

При вводе контура следует придерживаться следующих правил:

- при вводе участка контура можно не фиксировать узлы, лежащие на прямой, соединяющей опорные узлы. Они будут введены в контур автоматически. Исключением является

триангуляция «только на узлах контура», при выполнении которой учитываются только опорные узлы;

- замыкание контура выполняется двойным щелчком мыши после ввода последнего узла или указанием на первый узел;
- не допускается наличие совпадающих узлов как опорных, так и промежуточных. Здесь и далее под «совпадающими» будем понимать узлы, имеющие одинаковые координаты или отстоящие друг от друга на расстояние, которое меньше или равно значению *точности оценки совпадающих узлов*. Эта величина задается в диалоговом окне **Настройка параметров среды**, которое вызывается из одноименного раздела меню ***Настройки***;
- не допускается попадание совпадающих узлов внутрь контура;
- не допускается наличие внутри контура узлов (в том числе и принадлежащих другим контурам), лежащих от контура на расстоянии менее 0.15 заданного шага триангуляции. Наличие таких узлов приводит к прерыванию процесса триангуляции из-за появления вырожденных треугольников;
- внутренние контуры не должны пересекать или касаться наружного контура и один другого;
- не допускается наличие контуров, лежащих вне контура, ограничивающего область триангуляции.

Сохранение контура (или нескольких последовательно введенных контуров) выполняется одноименной кнопкой  . Управление сохранением выполняется в диалоговом окне **Сохранение контура триангуляции** (рис. 5.12-2). В этом окне в группе **Операции с контурами** находится ряд кнопок, с помощью которых выполняются следующие операции:

**Добавить контур** — введенный контур или группа контуров записываются в проект под именем, заданным в поле **Имя контура**. Если в указанном поле отсутствует информация, то контур запоминается под именем «**Контур №…**», где номер контура — это порядковый номер в списке введенных контуров.

**Заменить контур** — введенный контур записывается вместо одного из ранее сохраненных контуров. Для выполнения этой операции следует:

- ввести контур;
- выбрать в списке заменяемый контур (его номер и имя появятся в соответствующих полях);
- нажать кнопку **Заменить контур**.

**Заменить имя контура** — имя ранее сохраненного контура меняется на новое. Для выполнения операции следует:

- выбрать любой контур из списка контуров;
- активировать операцию сохранения контура;
- выбрать в списке контур, у которого меняется имя (его номер и имя появятся в соответствующих полях);
- записать в поле **Имя контура** новое имя;
- нажать кнопку **Заменить имя контура**.

**Удалить контур** — из списка контуров удаляется ранее записанный контур. Для выполнения операции следует:

- выбрать любой контур из списка контуров;
- активировать операцию сохранения контура;
- выбрать в списке удаляемый контур;
- нажать кнопку **Удалить контура**.

**Удалить все контуры** — из списка контуров удаляются все ранее записанные контуры. Для выполнения операции следует:

- выбрать любой контур из списка контуров;
- активировать операцию сохранения контура;
- нажать кнопку **Удалить все контуры**.

**Перечисленные выше операции будут выполнены после выхода из диалогового окна *Сохранение контура триангуляции* (производится нажатием кнопки ОК).**

Если область триангуляции включает несколько внутренних контуров, то их имеет смысл сохранять каждый в отдельности. Поскольку после сохранения контура автоматически выполняется операция **Сброс контура**, то сразу после ее выполнения можно вводить следующий контур.

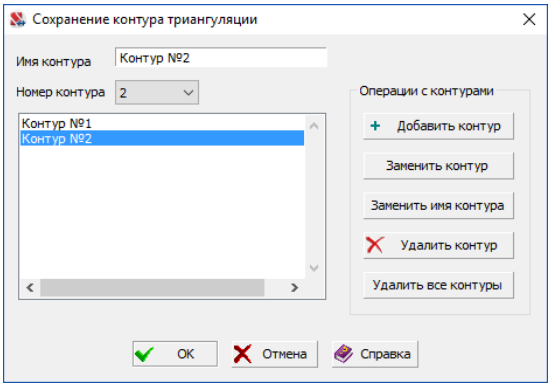



Рис. 5.12-2. *Диалоговое окно* **Сохранение контура триангуляции**

Если контур был задан некорректно, то его сброс выполняется нажатием кнопки **Отказ от результатов триангуляции**  .

Триангуляция не будет выполнена, если активны несколько контуров, принадлежащих разным областям триангуляции. В этом случае перед началом повторного ввода контура необходимо нажатием кнопки **Отказ…** очистить схему от всех контуров и повторить ввод или вызов из списка необходимого контура.

Если область триангуляции задана таким образом, что один или несколько внутренних контуров сохранены в качестве самостоятельных контуров, то первым из списка должен быть обязательно загружен внешний контур, а затем внутренние контуры в произвольном порядке.

## Преобразование стержней в контур триангуляции



Стержневые элементы можно использовать для задания контура триангуляции. Для выполнения этой операции необходимо выбрать (отметить) стержни, образующие контур, и нажать на кнопку **Преобразование стержней в контур триангуляции**.

Выбранные стержневые элементы должны отвечать следующим требованиям:

- лежать в одной плоскости;
- иметь ненулевую длину;
- не иметь разрывов, т. е. образовывать замкнутую линию без самопересечений.

Внутренне контуры могут быть образованы как стержневыми элементами, так и с помощью операции **Задание контура** и могут сохраняться отдельно от наружного контура.

Если выбранные стержневые элементы не отвечают перечисленным выше требованиям, появляется сообщение:

«Для выделенных стержней однозначное определение контура невозможно»

## Преобразование выпуклой оболочки отмеченных узлов в контур триангуляции



Контур триангуляции может быть задан как граница выпуклой оболочки отмеченных узлов. Для выполнения этой операции необходимо выбрать (отметить) узлы и нажать на кнопку **Преобразование выпуклой оболочки отмеченных узлов в контур триангуляции**.

Выбранные узлы должны отвечать следующим требованиям:

- количество узлов должно быть не менее трех;
- лежать в одной плоскости;
- не лежать на одной прямой.

## Превращение укрупненных элементов (объектов) в контур триангуляции



Укрупненные элементы или объекты создаются в препроцессоре **ФОРУМ** и моделируют такие элементы строительных конструкций, как колонны, балки, перекрытия, стены и крыши. Расчетная схема метода конечных элементов формируется путем автоматического преобразования этих объектов в наборы конечных элементов. При этом для преобразования плоскостных объектов (перекрытия, стены и крыши) используется триангуляция.

В программе предусмотрена возможность и неавтоматической триангуляции укрупненных элементов с использованием рассматриваемых операций. В этом случае каждый укрупненный элемент триангулируется в отдельности и его грани рассматриваются как контур (проемы — как внутренние контуры).

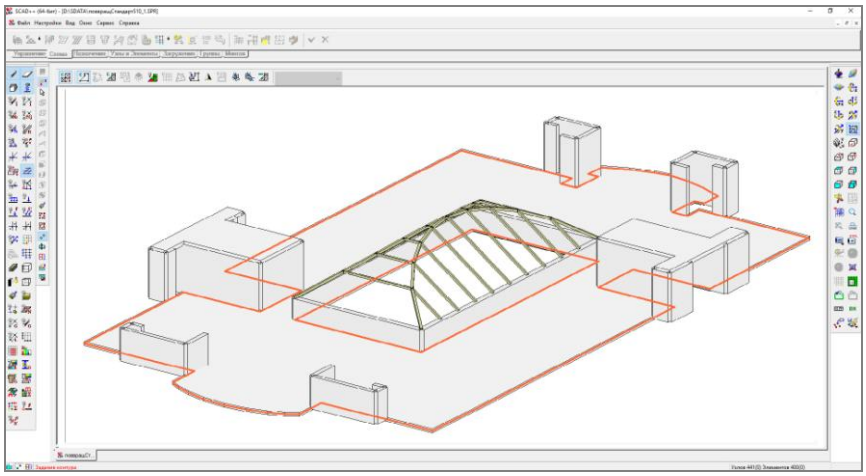


Рис. 5.12-3. *Контур триангуляции на основе элемента перекрытия*

Параметры жесткости, заданные для объекта, наследуются всеми конечными элементами, полученными в результате триангуляции.

Укрупненные элементы могут иметь произвольные очертания и включать произвольное количество внутренних контуров (проемов), не соприкасающихся друг с другом и не пересекающих внешний контур.

Триангуляция укрупненных элементов выполняется в следующем порядке:

- активировать функцию триангуляции в разделе инструментальной панели **Схема**;
- нажать кнопку **Превращение контурных элементов в контур триангуляции**;
- указанием на любой участок контура, в том числе и внутренний, выбрать необходимый элемент. Выбранный элемент будет выделен цветом (рис. 5.12-3);
- нажать кнопку **Генерация треугольной сетки КЭ на плоскости**  и в появившемся диалоговом окне назначить параметры триангуляции. После выхода из окна по кнопке **ОК** будет выполнена триангуляция.

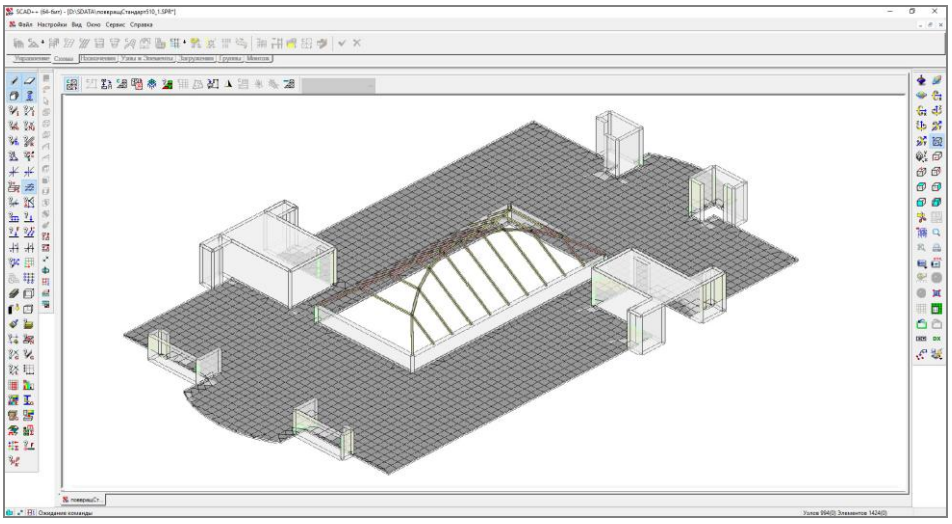


Рис. 5.12-4. *Схема, полученная в результате триангуляции укрупненного элемента*

Перед выходом из режима триангуляции полученная в результате схема (рис. 5.12-4) должна быть установлена на «место» или записана в виде отдельной схемы.

## Параметры триангуляции

Перед выполнением триангуляции в окне **Автоматическая триангуляция** (см. рис. 5.12-5) выбирается метод триангуляции, назначаются параметры и задаются (если это необходимо) жесткостные характеристики конечных элементов (для этого используется кнопка **Жесткости**).

В соответствии с выбранным методом триангуляция может быть выполнена:

- **А — Только на заданных узлах** — новые узлы не формируются, триангуляция выполняется таким образом, что в ней участвуют только существующие узлы на контуре и в области триангуляции;
- **Б — Без разбиения участков контура** — область триангуляции разбивается на конечные элементы с заданным максимальным размером рёбер (шаг триангуляции), но без ввода дополнительных узлов на участках контура;
- **В — С разбивкой контура** — область триангуляции и контур разбиваются в соответствии с заданным шагом;
- **Г — Только на узлах контура** — сетка конечных элементов строится только на узлах контура, узлы в области триангуляции в формировании сетки не используются (даже если они попали в область).

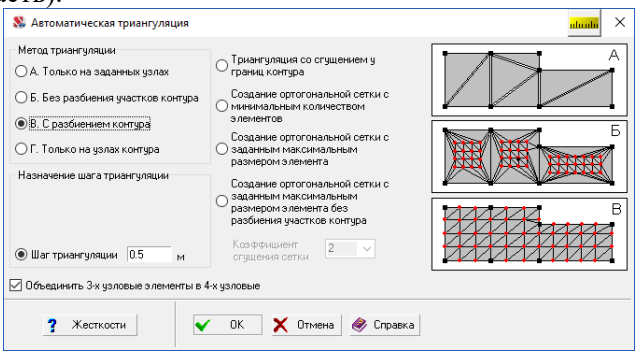



Рис. 5.12-5. *Диалоговое окно* **Автоматическая триангуляция**

Если в диалоговом окне **Автоматическая триангуляция** установлен признак объединения трехузловых элементов в четырехузловые, то в процессе формирования схемы такое объединение будет выполнено для всех допустимых пар треугольников.

Дополнительно могут быть заданы особенности формирования сетки, а именно:

**Триангуляция со сгущением у границ контура** — используется метод **В**, но у границ контура формируется сетка элементов, шаг которой меньше заданного в число раз, указанное в поле **Коэффициент сгущения сетки** (значение от 2 до 4);

**Формирование ортогональной сетки с минимальным количеством элементов** — ортогональная область триангуляции разбивается на конечные элементы с преимущественным использованием прямоугольных треугольников или квадратных и прямоугольных элементов (если активна опция **Объединить 3-х узловые элементы в 4-х узловые**);

**Формирование ортогональной сетки с заданным максимальным размером элемента** — формируется сетка с преимущественным использованием прямоугольных треугольников или квадратных и прямоугольных элементов (если активна опция **Объединить 3-х узловые элементы в 4-х узловые**), стороны которых меньше или равны значению шага;

**Формирование ортогональной сетки с заданным максимальным размером элемента без разбиения участков контура** — формируется сетка с преимущественным использованием прямоугольных треугольников или квадратных и прямоугольных элементов (если активна опция **Объединить 3-х узловые элементы в 4-х узловые**), стороны которых меньше или равны значению шага. При построении сетки не добавляются новые узлы на контуре.



**При формировании ортогональной сетки может возникнуть ситуация, при которой возникнут слишком "вытянутые" прямоугольники. В этом случае программа сама переключится на алгоритм создания неортогональной сетки, чтобы избежать появления элементов с плохой геометрической формой. При принятии решения о смене алгоритма программа ориентируется на заданное пользователем в параметрах расчета (см. главу 11) *максимально допустимое соотношение сторон плит и оболочек*.**

Для назначения жесткостных характеристик элементам в окне **Автоматическая триангуляция** используется кнопка **Жесткости**, нажатие которой вызывает диалоговое окно **Жесткости пластин**.

Схема, созданная в результате триангуляции, фактически является самостоятельной подсхемой, и после завершения триангуляции ее нужно «установить на место», т. е. присоединить к узлам расчетной схемы, которые учитывались при выполнении триангуляции. Для этого используется кнопка  — **Установка сформированной схемы по месту**.

Если подсхему предполагается присоединять и к другим участкам расчетной схемы или другим схемам, ее следует сохранить как отдельный проект под уникальным именем (отличным от имени основной схемы), воспользовавшись кнопкой  — **Запись результатов триангуляции**.

Если в результате триангуляции создана новая схема, то ее присоединение к основной схеме выполняется в режиме **Сборка** (см. раздел 5.13).

При триангуляции области, принадлежащей существующей расчетной схеме, контур задается непосредственно на схеме или ее фрагменте.

До тех пор, пока схема не установлена по месту, от результатов триангуляции можно отказаться, выполнив операцию **Отказ от результатов триангуляции** —  . Этой же операцией следует воспользоваться в случае, когда после установки схемы по месту необходимо продолжить работу в режиме триангуляции.

### Некоторые «тонкости»

- Если в область триангуляции попали стержневые элементы, включая контурные, то они разбиваются на ряд элементов по длине в соответствии с заданным шагом триангуляции.
- Все узлы, попавшие в область триангуляции и не принадлежащие области внутренних контуров, будут учтены при формировании сетки.
- Триангуляция не выполняется, если в области триангуляции есть совпадающие узлы;

- Если после выполнения триангуляции необходимо повторить разбиение установленной области, например, с другим шагом или способом триангуляции, то для этого достаточно, не сбрасывая ранее полученную разбивку, вызвать повторно операцию **Генерация треугольной сетки КЭ на плоскости** —  и задать новые параметры триангуляции.
- Если по какой-либо причине необходимо повторить ввод ранее введенного контура, то перед этим надо обязательно выполнить операцию **Отказ от результатов триангуляции** —  , в противном случае будет выдано сообщение об ошибке.

## Сгущение сетки

Для сгущения сетки в окрестностях существующих узлов следует выполнить следующие действия:

- задать или выбрать из списка контур триангуляции;
- нажать кнопку  — **Указание узлов сгущения сетки**;
- выбрать узлы, в окрестностях которых сгущается сетка (выбранные узлы будут выделены цветом);
- нажать кнопку  — **Генерация треугольной сетки КЭ на плоскости**;
- в диалоговом окне **Автоматическая триангуляция** выбрать режим триангуляции и назначить коэффициент сгущения сетки (от двух до четырех);
- нажать кнопку **ОК** в диалоговом окне.

Сгущение сетки вдоль линии выполняется в следующем порядке:

- задать или выбрать из списка контур триангуляции;
- нажать кнопку  — **Указание линии сгущения сетки**;
- выполнить ввод линий по правилам, аналогичным вводу стержней (введенные линии будут выделены цветом контура);
- нажать кнопку  — **Генерация треугольной сетки КЭ на плоскости**;
- в диалоговом окне **Автоматическая триангуляция** выбрать режим триангуляции и назначить коэффициент сгущения сетки (от двух до четырех);
- нажать кнопку **ОК** в диалоговом окне.

Допускается одновременно выполнять сгущение сетки в окрестностях узлов и вдоль линий.

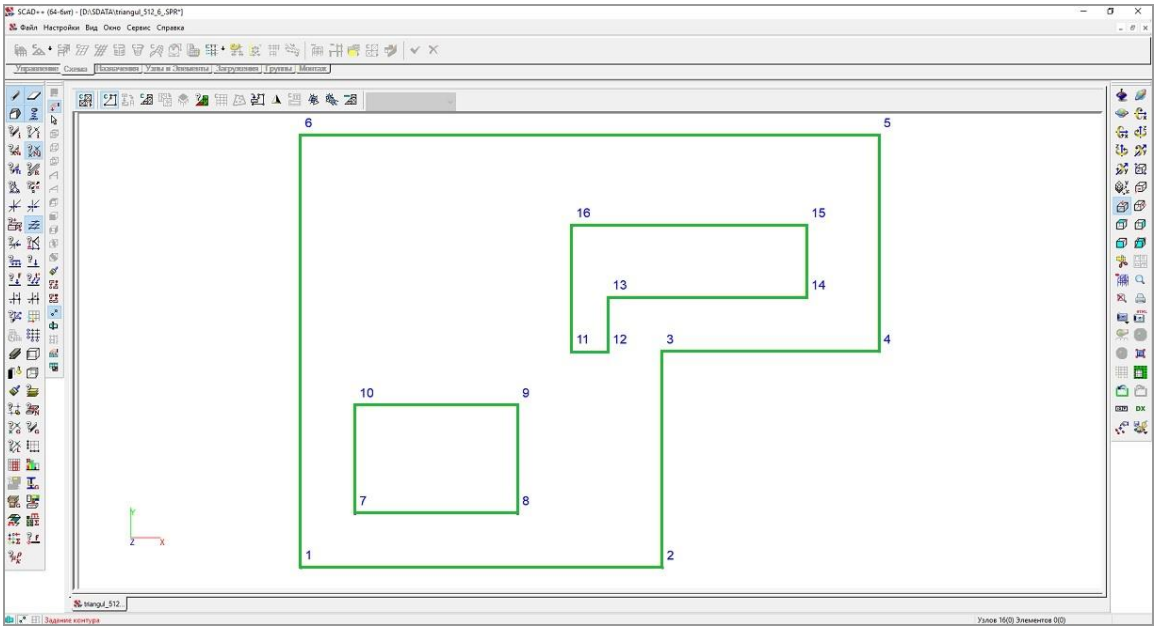


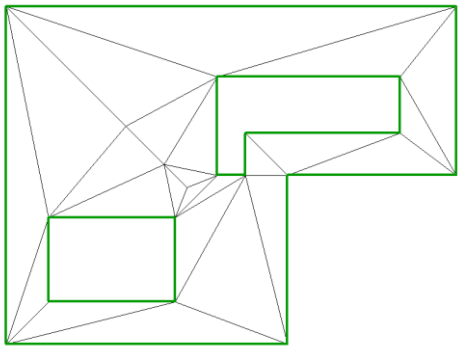

Рис. 5.12-6. *Узлы в области триангуляции и заданные на их основе контуры*

В качестве примера рассмотрим триангуляцию области, лежащей в плоскости XOY, с узлами, координаты которых приведены в следующей таблице:

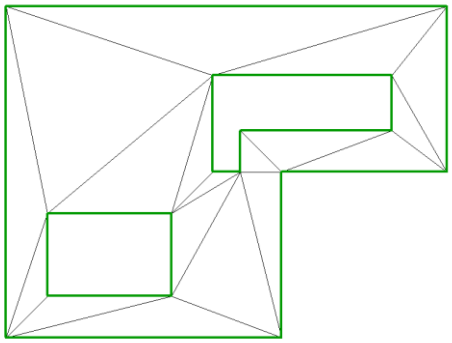
| Узлы внешнего контура | | | Узлы внутренних контуров | | |
|---|---|---|---|---|---|
| № узла | X | Y | № узла | X | Y |
| 1 | 0.0 | 0.0 | 7 | 3.0 | 3.0 |
| 2 | 20.0 | 0.0 | 8 | 12.0 | 3.0 |
| 3 | 20.0 | 12.0 | 9 | 12.0 | 9.0 |
| 4 | 32.0 | 12.0 | 10 | 3.0 | 9.0 |
| 5 | 32.0 | 24.0 | 11 | 15.0 | 12.0 |
| 6 | 0.0 | 24.0 | 12 | 17.0 | 12.0 |
| | | | 13 | 17.0 | 15.0 |
| | | | 14 | 28.0 | 15.0 |
| | | | 15 | 28.0 | 19.0 |
| | | | 16 | 15.0 | 19.0 |

Номера введенных узлов и контуры, заданные на их основе, показаны на рис. 5.12-6. В области триангуляции в зависимости от выбранного метода могут быть сформированы различные сетки, показанные на рисунках ниже.

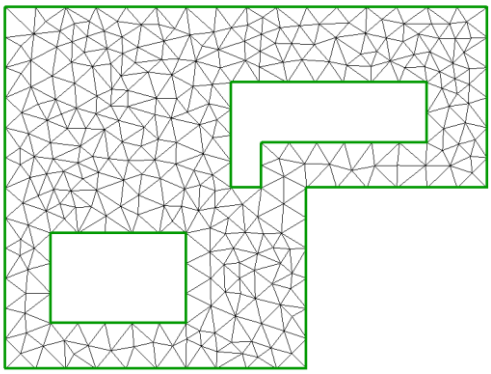
В зависимости от выбранного метода триангуляции в приведенной на рисунке 5.12-6 области будут получены следующие сетки конечных элементов:



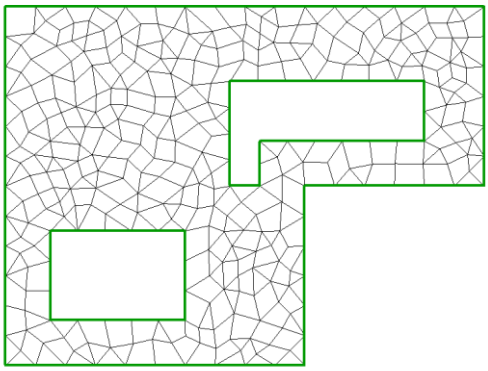
- без разбиения участков контура;



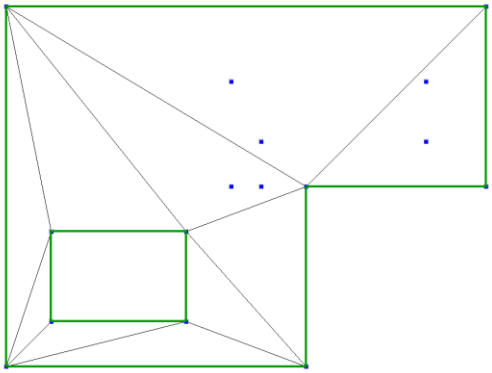
- только на заданных узлах;



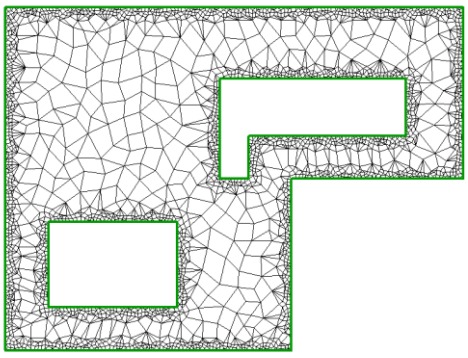
- с разбивкой контура (маркер **Объединить 3-х узловые элементы в 4-х узловые** выключен);



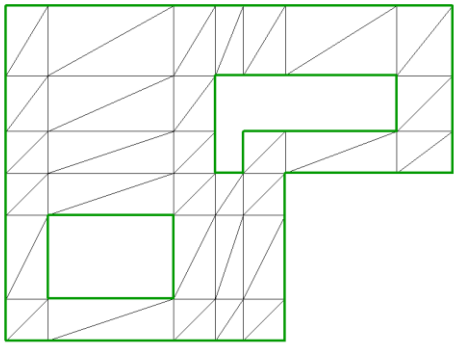
- с разбивкой контура (маркер **Объединить 3-х узловые элементы в 4-х узловые** включен);



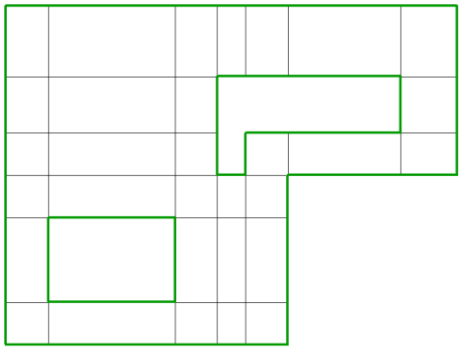
- только на узлах контура;



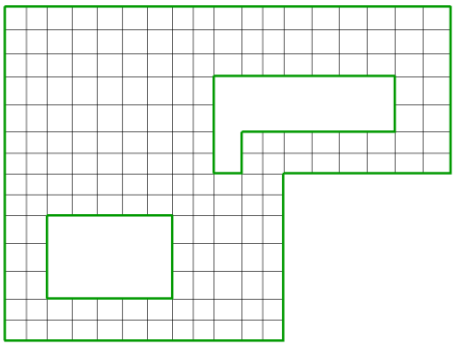
- триангуляция со сгущением у границ контура;



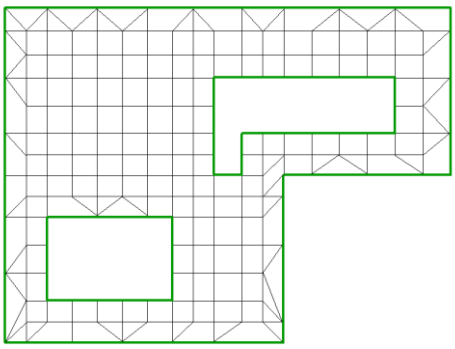
- формирование ортогональной сетки с минимальным количеством элементов (маркер **Объединить 3-х узловые элементы в 4-х узловые** выключен);



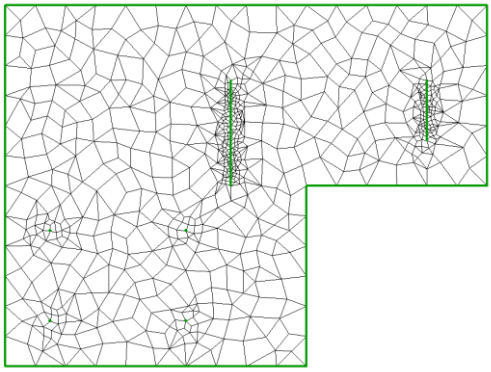
- формирование ортогональной сетки с минимальным количеством элементов (маркер **Объединить 3-х узловые элементы в 4-х узловые** включен);



- формирование ортогональной сетки с заданным максимальным размером элемента;



- формирование ортогональной сетки с заданным максимальным размером элемента без разбиения участков контура;



- сгущение сетки в окрестности выбранных узлов и вдоль заданных линий.

## Оценка качества триангуляции



Для оценки качества полученной сетки конечных элементов используется одноименная операция в инструментальной панели управления триангуляцией. При нажатии этой кнопки появляется меню, в котором можно выбрать два варианта: *качество триангуляции* или *геометрические характеристики элементов*.

Для трех и четырех узловых элементов оценка выполняется по следующим параметрам:

- коэффициент формы — величина, вычисляемая по формулам $\frac{\sum_{i=1,2,3,4} L_i^2}{4S}$ (для четырехугольников) и $\frac{\sum_{i=1,2,3} L_i^2}{4\sqrt{3}S}$ (для треугольников), где $L_i$ — длина $i$-й стороны, $S$ — площадь элемента;
- минимальный угол в элементе — в качестве критерия качества используется минимальный угол элемента;
- максимальный угол в элементе — в качестве критерия качества используется максимальный угол элемента;
- депланация (отклонение от плоскостности) для четырехузловых элементов — по четырем точкам строится плоскость, которая наилучшим образом аппроксимирует вершины элемента. Вычисляется максимум из расстояний от вершин до плоскости. Результат делится на длину минимальной стороны.

Для объемных элементов оценка выполняется по следующим параметрам:

- отношение длин максимального и минимального ребер;
- коэффициент формы — величина, равная максимальному для всех граней коэффициенту формы.

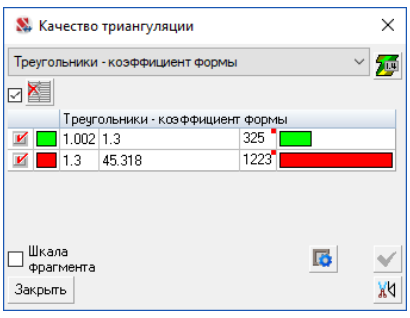



Рис. 5.12-7. *Диалоговое окно* **Качество триангуляции**

Результаты оценки качества отображаются в виде цветовой шкалы (рис. 5.12-7). Зеленым цветом на схеме отмечаются элементы, у которых значение исследуемого фактора лежит в пределах установленной нормы, а красным — выходит за эти пределы. Диапазон допустимых значений «**От** и **До**» задается в одноименных полях ввода диалогового окна **Настройки** (рис. 5.12-8), которое вызывается нажатием кнопки **Настройки цветовой шкалы** —  .

Принципы управления цветовой шкалой не отличаются от цветовых шкал визуализации других

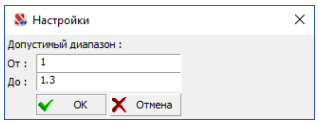



Рис. 5.12-8. *Диалоговое окно* **Настройки**

Опция *геометрические характеристики элементов* позволяет получить цветовую шкалу длин двухузловых элементов, площадей пластин или объемов объемных конечных элементов.

### Повышение качества триангуляции



Если качество триангуляции (оценить его можно с помощью операции  ) оказывается неудовлетворительным, то его можно попытаться повысить, нажав в инструментальной панели кнопку  . При этом программа произведет попытку сместить те узлы, которые были порождены в процессе создания конечно-элементной сетки, таким образом, чтобы улучшить показатели качества.

### Экспорт контура триангуляции в программу GMSH



Эта операция используется для сохранения контура триангуляции в формате программы **GMSH** (свободно распространяемая программа триангуляции). После выполнения триангуляции этой программой полученную сетку можно импортировать в **SCAD** (см. раздел 36.1).

## 5.13. Сборка схемы из нескольких схем

 **— Режим сборки**

Этот режим позволяет выполнить формирование расчетной схемы путем ее сборки из нескольких заранее приготовленных схем и/или групп элементов (создание групп и работа с ними описаны в разделе 6.6). В сборке могут также участвовать фрагмент схемы или набор предварительно селектированных элементов. При этом схемы, используемые при сборке, могут включать кроме геометрии и другие характеристики, например, связи, жесткости, нагрузки и т. п., которые в результате сборки попадут в результирующую схему. Для удобства схему, к которой присоединяются другие схемы, будем называть основной, а присоединяемые схемы — подсхемами. При этом в качестве основной схемы может быть использован даже один узел, а в качестве подсхемы — любая другая схема, в том числе и основная, а также группы элементов.



Рис. 5.13-1. *Инструментальная панель режима сборки*



Рис. 5.13-2. *Инструментальная панель окна подсхемы в режиме сборки*

Инструментальная панель в режиме сборки (рис. 5.13-1) включает следующие кнопки:

 — выбор способа сборки;

 — активировать основную схему;

 — активировать присоединяемую схему;

 — выполнить сборку.

Подсхема, участвующая в сборке, загружается в отдельное окно. Инструментальная панель окна подсхемы (рис. 5.13-2) включает кнопку выбора группы элементов, используемую в качестве

подсхемы —  , кнопку загрузки расчетной схемы-подсхемы —  , а также кнопку выбора в качестве подсхемы одной из ранее загруженных расчетных схем —  . В последнем случае это может быть и основная схема, одновременно используемая как подсхема.

Если до активации операции сборки на основной схеме селектировать элементы, то эти элементы будут автоматически представлены в качестве подсхемы (присоединяемой схемы). При необходимости подсхему можно заменить и использовать в качестве подсхемы другую схему или группу элементов.



**Селекция элементов должна быть выполнена до активации операции сборки.**

Рекомендуется придерживаться следующего порядка выполнения сборки:

- в разделе **Схема** нажать кнопку  — **Режим сборки**, в результате чего в инструментальной панели главного окна появится панель режима сборки (рис. 5.13-1), а в рабочем поле — окно для загрузки подсхемы;
- воспользовавшись одной из кнопок в инструментальной панели окна подсхемы, загрузить подсхему (для загрузки в качестве подсхемы другой расчетной схемы используется стандартное диалоговое окно **Открыть**);
- нажать кнопку  — **Выбор способа сборки**;
- в диалоговом окне **Сборка схемы** (рис. 5.13-3) назначить способ и правила сборки;
- выйти из диалогового окна нажатием кнопки **ОК**;
- в зависимости от выбранного способа сборки отметить на схеме и подсхеме один, два или три узла стыковки и нажать кнопку **ОК** в инструментальной панели главного окна.

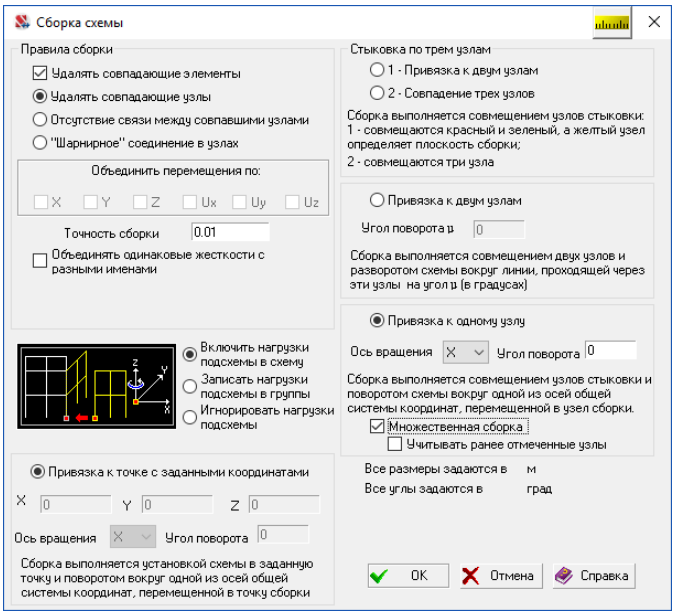



Рис. 5.13-3. *Диалоговое окно* **Сборка схемы**

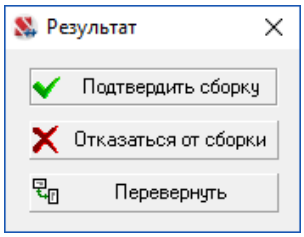



Рис. 5.13-4. *Диалоговое окно* **Результат**

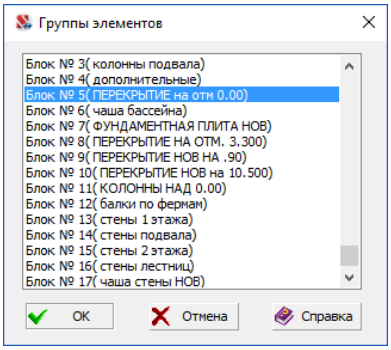



Рис. 5.13-5. *Диалоговое окно* **Группы элементов**

После выполнения сборки в окне основной схемы выводится результирующая схема и диалоговое окно **Результат**, в котором предлагается выбрать вариант продолжения работы (рис. 5.13-4).

Первый вариант продолжения работы — **Подтвердить сборку**. В соответствии с установленными правилами сборки будет образована новая основная схема как результат объединения основной схемы и подсхемы.

Второй вариант — **Отказаться от сборки**. В результате основная схема останется в том же состоянии, что и до сборки.

Третий вариант — **Перевернуть** (подсхему). Подсхема займет новое положение относительно узла/узлов стыковки, которое образуется поворотом на 180° вокруг узлов стыковки или заданной ранее оси вращения (при сборке с одним узлом стыковки).

Если в качестве подсхемы используются группы элементов (допускается сборка одновременно с несколькими группами), то их выбор выполняется в диалоговом окне **Группы элементов** (рис. 5.13-5). Отмеченные в списке группы выделяются на расчетной схеме красным цветом. После выхода из диалогового окна нажатием кнопки **ОК** эти группы будут загружены в окно подсхемы.

## Способы сборки

**Стыковка по трем узлам** предполагает выбор трех узлов на схеме и подсхеме и может осуществляться двумя способами — **Примыкание к двум узлам** или **Совпадение трех узлов**. Способ сборки назначается активацией соответствующего маркера в группе **Стыковка по трем узлам**.

При использовании первого способа привязка подсхемы выполняется к двум узлам — красному и зеленому, а желтый узел определяет плоскость (направление) сборки. В этом случае схема может занимать два положения относительно узлов привязки, поэтому после выполнения сборки полезной может оказаться операция **Перевернуть**, описанная выше.

Второй способ сборки предполагает совпадение трех узлов схемы и подсхемы, что определяет положение подсхемы однозначно.

**Привязка к двум узлам** осуществляется совмещением одноцветных узлов стыковки на схеме и подсхеме. Очевидно, что в этом случае подсхема может занимать любое положение относительно узлов стыковки, и для того, чтобы определить его однозначно, необходимо задать угол поворота подсхемы вокруг оси, проходящей через эти узлы.

Если при сборке по двум узлам расстояния между соответствующими узлами схемы и подсхемы не равны, то подсхема масштабируется с коэффициентом, равным отношению расстояний между стыковочными узлами подсхемы и схемы.

**Привязка к одному узлу** осуществляется совмещением узлов стыковки на схеме и подсхеме с одновременным разворотом подсхемы на заданный угол вокруг указанной оси, проходящей через узел стыковки и параллельной соответствующей оси общей системы координат. Если активировать маркер **Множественная сборка**, то на основной схеме можно отметить несколько узлов привязки подсхемы, к каждому из которых подсхема будет привязана выбранным на ней узлом.

**Привязка к точке с заданными координатами** осуществляется аналогично стыковке по одному узлу. Роль узла в основной схеме выполняет точка с заданными координатами, к которой присоединяется выбранный узел подсхемы.

## Правила выполнения сборки

Сборка может выполняться по различным правилам и с заданной точностью совмещения узлов. Точность совмещения определяет, какие узлы считать совпадающими. Если после выполнения сборки расстояние между узлом схемы и узлом подсхемы меньше или равно установленному значению точности, то в режиме объединения совпадающих узлов такие узлы совмещаются в один узел.

При активной опции **Удалять совпадающие элементы** в диалоговом окне **Сборка схемы** (см. рис. 5.13-3) из двух совпавших элементов основной схемы и подсхемы (элементы считаются совпавшими, если совпадают все их узлы) в результирующей схеме остается элемент основной схемы. У этого элемента все характеристики будут такими же, как у элемента основной схемы. К нагрузкам элемента основной схемы будут добавлены нагрузки совпавшего элемента из подсхемы. Если опция **Удалять совпадающие элементы** не активна, то в результирующей схеме будут присутствовать одновременно все элементы схемы и подсхемы.

При активной опции **Удалять совпадающие узлы** из результирующей схемы удаляются все узлы подсхемы, которые совпали с узлами основной схемы. Связи и нагрузки, приложенные в узлах, будут соответствовать заданным в основной схеме.

При активной опции **Отсутствие связи между совпавшими узлами** в результирующей схеме будут присутствовать все узлы обеих схем без какой-либо связи между ними.

При активной опции **"Шарнирное" соединение в узлах** между совпавшими узлами будут установлены шарниры (ползуны) по направлениям, на которые не наложены связи. В результате по направлениям связей задается объединение перемещений между узлом схемы и подсхемы. Связи задаются с помощью соответствующих маркеров в группе **Объединять перемещения по**.

При выполнении сборки производится упаковка жесткостей присоединяемых подсхем. С помощью маркера **Объединять совпадающие жесткости с разными именами** можно "влиять" на процесс упаковки.



**Показатель точности совмещения узлов при сборке является самостоятельным параметром и может отличаться от величины, определяющей точность совпадения узлов в схеме.**

## Работа с нагрузками

Если в сборке участвуют схемы, к которым были приложены нагрузки, то при назначении правил выполнения сборки следует указать, как поступать с нагрузками.

Предлагается три способа учета нагрузок подсхем:

- включение нагрузок, приложенных к подсхемам, в соответствующие загружения основной схемы;
- запись каждого загружения подсхем в виде группы нагрузок;
- игнорирование нагрузок подсхем.

Нагрузки, приложенные к основной схеме, остаются всегда. Если одна или несколько подсхем имеют больше загружений, чем основная схема, то эти их загружения добавляются как группы нагрузок.

При переносе нагрузок с подсхемы в результирующую схему следует учитывать, что операции объединения совпадающих узлов и элементов (они выполняются, если включены соответствующие маркеры в диалоговом окне **Сборка схемы**) имеют приоритет и выполняются раньше операций переноса нагрузок. Следовательно, если нагрузки в подсхеме заданы в узлах, совпадающих с узлами основной схемы, то после удаления узлов подсхемы будут удалены и нагрузки. В тех случаях, когда нагрузки должны быть учтены, следует при назначении правил сборки отключить опции объединения совпадающих объектов, выполнить сборку, а затем удалить совпадающие узлы и элементы, воспользовавшись для этого соответствующими режимами в разделе **Узлы и Элементы** инструментальной панели.

Если к узлам или элементам основной схемы, совпадающим с объектами подсхемы, не приложены нагрузки, то проблему переноса нагрузок можно решить, поменяв статус схем при сборке, т. е. принять за основную схему подсхему и наоборот. Эти рекомендации будут полезными и в тех

случаях, когда в сборке участвуют схемы, состоящие из одних узлов, к которым приложены нагрузки. Как правило, они являются результатом выполнения операции сохранения нагрузок от фрагмента схемы в качестве самостоятельной схемы (см. разд. **Анализ результатов расчета нагрузок от фрагмента схемы**).



**Недопустимо включение динамических воздействий подсхемы в статические загружения основной схемы.**

**При объединении динамических нагрузок подсхемы и основной схемы будут добавлены только массы.**

## 5.14. Копирование расчетной схемы



Рассмотрим еще один эффективный способ создания расчетной схемы, действие которого основано на копировании с заданными шагом и направлением схемы-прототипа. Копировать можно как готовую схему, т. е. с введенными жесткостными характеристиками, шарнирами, связями, нагрузками и т. п., так и схему, для которой задана только часть характеристик.

Вызов режима копирования выполняется одноименной кнопкой из раздела **Схема**.

Копирование может выполняться по различным правилам. Простейший случай — схема просто повторяется заданное количество раз. В процессе повторений выполняется контроль совпадения узлов и элементов и, если был установлен маркер исключения совпадающих объектов, то они удаляются из результирующей схемы.

При копировании схемы с выбранными (отмеченными) узлами и элементами выполняется преобразование типа выбранных объектов по следующим правилам:

- если в схеме-прототипе были выбраны узлы, из каждого такого узла порождается стержневой элемент, соединяющий его с узлом-аналогом на копии;
- если в схеме-прототипе были выбраны стержневые элементы, каждый выбранный стержень будет порождать пластинчатый элемент (трехузловой — тип 42 или четырехузловой — тип 44), размер которого в направлении копирования будет равен заданному шагу копирования;
- если в схеме-прототипе были выбраны пластинчатые элементы, каждый выбранный элемент будет порождать объемный элемент (тип 36, 33 или 34), размер которого в направлении копирования будет равен заданному шагу копирования (см. разд. 5.16).

Правила преобразования выбранных объектов будут выполняться и для любой их комбинации.

В тех случаях, когда в окне отображается фрагмент расчетной схемы, при инициации операции появляется выпадающее меню, в котором предлагается выбрать объект копирования — вся схема или видимый фрагмент. В первом случае, т.е. когда в качестве объекта копирования выступает вся схема, операция по приведенным выше правилам будет применена ко всем узлам и элементам расчетной схемы, независимо от того входят они в видимый фрагмент или нет. В случае копирования видимого фрагмента, — указанные выше действия будут выполняться только с узлами и элементами фрагмента.

Еще один вид копирования выполняется путем зеркального отображения всей схемы или ее видимой части вдоль выбранной оси относительно начала общей системы координат. Операция будет выполняться по тем же правилам, что и копирование по указанному направлению.

Управление режимом копирования выполняется в диалоговом окне **Копирование схемы** (рис. 5.14-1). В этом окне устанавливается направление копирования:

- по прямой вдоль одной из осей общей системы координат;
- по дуге окружности вокруг заданной оси (ось вращения проходит через начало общей системы координат, в качестве шага вводится центральный угол);
- зеркальное отображение;
- копирование вдоль траектории (см. раздел 5.20).

Для первых двух операций в качестве параметров копирования задаются шаги повторений прототипа и количество повторений для каждого шага (при копировании по дуге в качестве шага вводится центральный угол в градусах).

Зеркальное отображение прототипа выполняется путем изменения знака координат узлов копии, соответствующих оси, вдоль которой выполняется зеркализация. Поскольку положение копии в результате зеркализации зависит от положения начала общей системы координат, перед выполнением операции следует выполнить перенос начала координат в нужную точку или в соответствующем поле ввода указать нужное смещение начала координат.

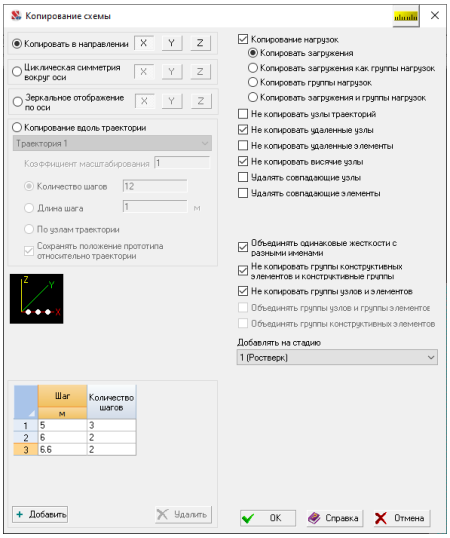



Рис. 5.14-1. *Диалоговое окно* **Копирование схемы**

Остановимся подробнее на правилах обслуживания копии. Они назначаются активацией соответствующих маркеров и позволяют выполнить следующие операции:

- **Копирование нагрузок**, т. е. перенос из схемы-прототипа нагрузок на схемы-копии. Предусмотрены следующие варианты копирования нагрузок:
  - **Копировать загружения** — в копии переносятся только загружения, заданные в прототипе;
  - **Копировать загружения как группы нагрузок —** переносятся только загружения, заданные в прототипе, которые в копии представлены как группы нагрузок;
  - **Копировать группы нагрузок** — в копии переносятся только группы нагрузок, заданные в прототипе;
  - **Копировать загружения и группы нагрузок** — в копии переносятся как загружения, так и группы нагрузок.
- **Удалять совпадающие узлы** — если в результате копирования появятся узлы с одинаковыми координатами, то в результирующей схеме из них останется только один узел. Два узла считаются совпадающими, если расстояние между ними меньше величины, заданной пользователем в диалоговом окне **Настройка параметров среды** (см. раздел меню ***Настройки***);
- **Удалять совпадающие элементы —** если в результате копирования появятся элементы, все узлы которых совпадают, то в результирующей схеме из них останется только один элемент;
- **Не удалять стержни, породившие пластины и пластины породившие объёмные элементы** — этот маркер будет доступен, если в схеме есть отмеченные стержни или пластины. При активном маркере отмеченные стержни и пластины не удаляются из расчетной схемы;
- **Не изменять исходный прототип** — этот пункт позволяет сохранить схему-прототип без изменений в тех случаях, когда удаляются стержни, порождающие пластины;
- **Объединять совпадающие жесткости с одинаковыми именами** — при копировании схемы производится упаковка жесткостей; данный маркер позволяет "влиять" на процесс упаковки;
- **Не копировать группы конструктивных элементов и конструктивные элементы** — при использовании данного маркера в результирующей схеме будут только конструктивные группы первоначальной схемы;

- **Не копировать группы узлов и элементов** — при использовании данного маркера в результирующей схеме будут только первоначальные группы узлов и группы элементов;
- **Объединять группы узлов и группы элементов** — списки групп узлов/элементов будут дополнены номерами соответствующих узлов/элементов из создаваемых копий;
- **Объединять группы конструктивных элементов** — использование данного маркера позволяет добавить элементы из копий соответствующих групп стальных и железобетонных конструктивных элементов в группы прототипа; данная опция не распространяется на конструктивные элементы.

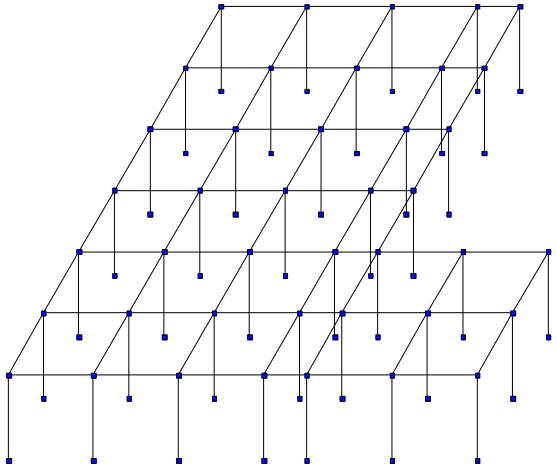


Рис. 5.14-2. *Схема-прототип*

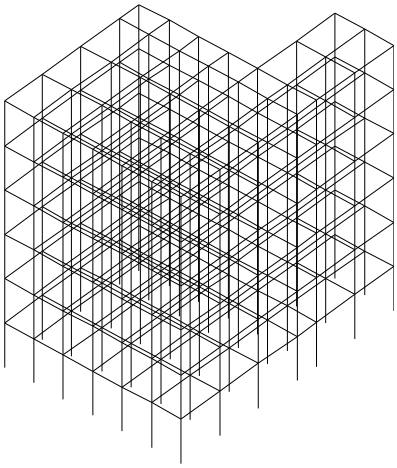


Рис. 5.14-3. *Схема после операции копирования*

Копирование схем возможно с порождением новых элементов и без порождения новых элементов, порядок действий в этих случаях несколько различный.

При копировании схемы *без порождения новых элементов*:

- в разделе **Схема** нажатием кнопки  активировать режим копирования;
- в диалоговом окне **Копирование схемы** (рис. 5.14-1) назначить параметры копирования, правила обслуживания копий и нажать кнопку **ОК**;
- после выполнения копирования подтвердить результаты работы или отказаться от них.

При копировании *с порождением новых элементов*:

- воспользовавшись группой кнопок управления выбором элементов и узлов  , расположенной в левом углу строки состояния (или на панели **Управление выбором**), выбрать на прототипе узлы, из которых следует порождать стержни, стержневые элементы, которые должны порождать пластины, и пластины, из которых следует порождать объемные элементы;
- в разделе **Схема** нажатием кнопки  активировать режим копирования;
- в диалоговом окне **Копирование схемы** назначить параметры копирования, правила обслуживания копий и нажать кнопку **ОК**;
- после выполнения копирования подтвердить результаты работы или отказаться от них.

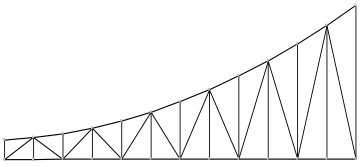


Рис. 5.14-4. *Схема-прототип*

Рассмотрим несколько примеров выполнения операции копирования. В первом случае скопируем 5 раз схему-прототип (рис. 5.14-2) в направлении оси Z с шагом 3 м. Результирующая схема (развернутая для наглядности на угол 60°) показана на рис. 5.14-3.

В следующем примере в качестве схемы-прототипа использована стержневая конструкция, верхний пояс которой представляет собой параболу (рис. 5.14-4).

Копирование выполнялось 24 раза поворотом вокруг

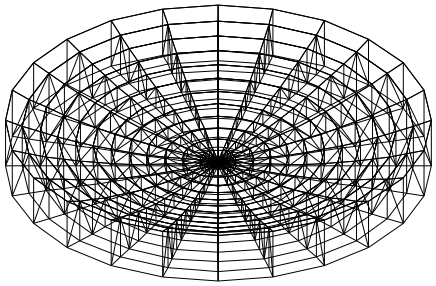


Рис. 5.14-5. *Схема-результат копирования прототипа с порождением стержней*

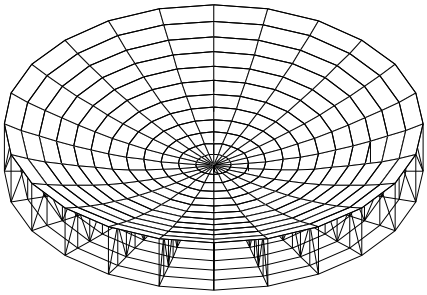


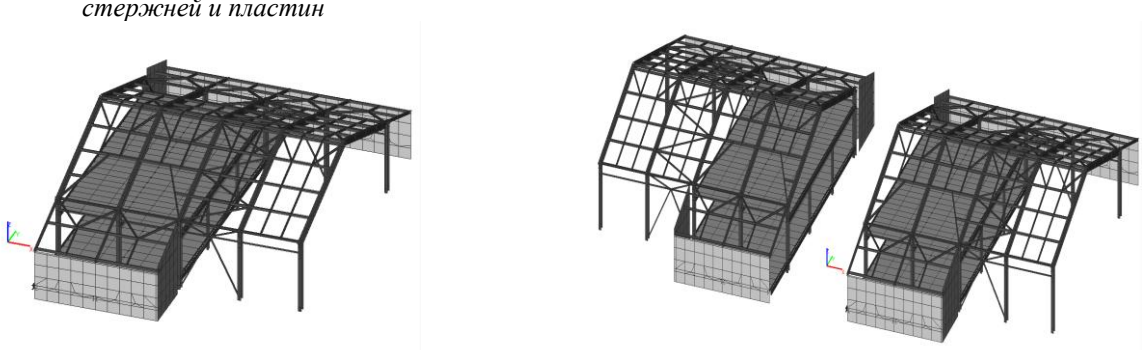
Рис. 5.14-6. *Схема-результат копирования прототипа с порождением стержней и пластин*

оси Z на угол 15°. Из каждого отмеченного узла порождался стержень. Результат работы функции представлен на рис. 5.14-5.

Если в схеме-прототипе, кроме узлов, будут выбраны и стержни верхнего пояса, то в результате копирования получим схему, изображенную на рис. 5.14-6. Обратите внимание — каждый выбранный стержень породил пластину.

В рассмотренном способе копирования операции выполняются только над полной расчетной схемой, т. е. прототип не может быть фрагментом схемы.

Вопросы порождения в процессе копирования объемных элементов рассматриваются в разделе 5.16.



*а)* *б)*

Рис. 5.14-7. Копирование фрагмента схемы (а) путем зеркального отображения относительно начала общей системы координат вдоль оси X (б)

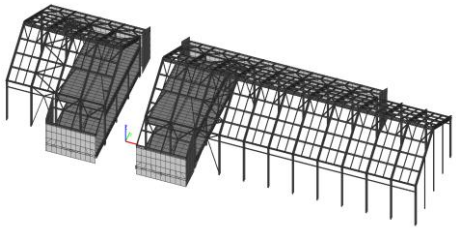


Рис. 5.14-8. Результат выполнения операции копирования

На рисунке 5.14-7 приведен пример копирования фрагмента схемы путем зеркализации. Результирующая схема показана на рис. 5.14-8. Следует отметить, что в данном режиме действуют те же правила порождения элементов из выбранных узлов и элементов, что и при копировании по прямой и дуге окружности.

## 5.15. Копирование фрагмента схемы



Кроме копирования полной схемы возможно и копирование её фрагмента. В отличие от описанной выше операции, где речь идет о копирования выделенного (изолированного) фрагмента,

здесь рассматривается любая часть схемы, состоящая из выбранных (отмеченных) элементов. При копировании отмеченного фрагмента не выполняется порождение стержней из выбранных узлов, пластин — из выбранных стержней и объемных элементов — из выбранных пластин. В остальном, правила копирования совпадают с правилами копирования полной схемы.

## 5.16. Формирование расчетных схем из объемных элементов

Операция копирования может использоваться и для формирования расчетных схем из объемных элементов. В этом случае прототипом является схема из пластинчатых элементов. Для образования объемных элементов используется правило: отмеченная на прототипе пластина порождает объемный элемент. При этом если на прототипе выбраны узлы, стержни и пластины, то будет создана комбинированная схема из стержневых, пластинчатых и объемных элементов.

В качестве примера рассмотрим формирование расчетной схемы из объемных элементов на основе прототипа, приведенного на рис. 5.16-1 (прототип получен путем автоматической триангуляции заданной области, лежащей в плоскости XOY).

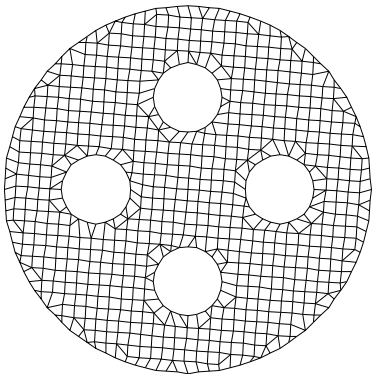


Рис. 5.16-1. *Расчетная схема из пластинчатых элементов, используемая в качестве прототипа*

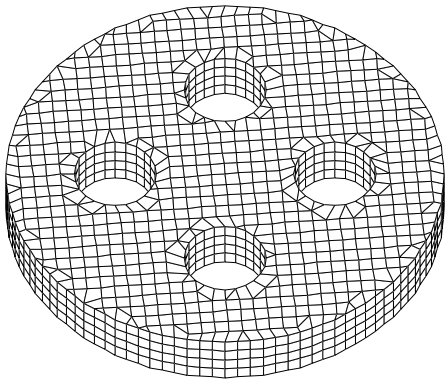


Рис. 5.16-2. *Расчетная схема из объемных элементов*

Выберем все элементы прототипа и активируем функцию копирования в разделе **Схема** нажатием клавиши  . В диалоговом окне **Копирование схемы** установим направление копирования — Z, количество повторений прототипа и шаг. После нажатия кнопки **OK** будет сформирована расчетная схема, приведенная на рис. 5.16-2.

Аналогичным образом можно сформировать схему и путем копирования прототипа по дуге окружности. При этом следует так определить точку начала осей общей системы координат, чтобы ось вращения не пересекала элементы прототипа.

## 5.17. Геометрические преобразования



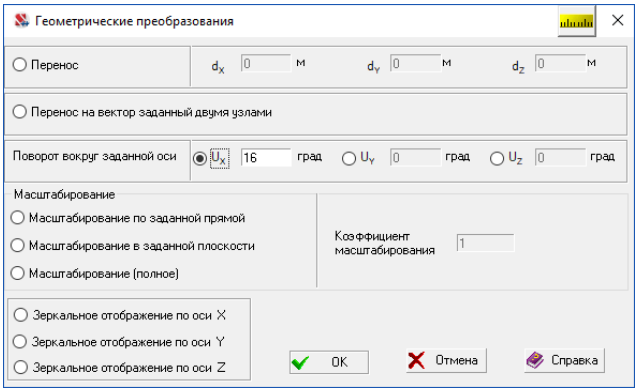



Рис. 5.17-1. *Диалоговое окно* **Геометрические преобразования**

Набор геометрических преобразований позволяет модифицировать геометрию расчетной схемы или ее фрагмента путем изменения координат узлов. Набор включает: перенос координат узлов, разворот вокруг заданной оси, масштабирование и зеркальное отражение.

Кнопка вызова операций расположена в разделе **Схема** инструментальной панели, и нажатие ее открывает диалоговое окно (рис. 5.17-1) **Геометрические преобразования**.

Если преобразования относятся ко всей схеме, то они будут выполнены после нажатия кнопки **ОК** диалогового окна. При преобразовании фрагмента (группы узлов) следует сначала выбрать (отметить) узлы, а затем назначить и выполнить необходимую операцию.

### Перенос

С помощью этой операции выполняется перенос узлов на заданное расстояние от исходного положения. Если на схеме не выбран ни один узел, то перенос будет реализован для всей схемы. В тех случаях, когда на схеме выбрана группа узлов, будут перенесены только узлы группы. Для выполнения функции следует активировать опцию **Перенос**, ввести приращения координат и подтвердить назначения нажатием кнопки **ОК** в диалоговом окне.

Кроме того, можно использовать операцию переноса, в которой расстояния определяются вектором, заданным двумя узлами. Для выполнения такого переноса следует активировать в диалоговом окне нужную опцию и нажать кнопку **ОК**. Если выбрать курсором первый узел вектора и протянуть резиновую нить до второго узла, перенос будет выполнено после фиксации второго узла.

### Поворот вокруг заданной оси

С помощью этой операции выполняется поворот схемы или группы узлов на заданный угол вокруг указанной оси. Порядок выполнения традиционный — активировать опцию с именем нужной оси, ввести угол и нажать кнопку **ОК**. Для того чтобы получить корректный результат, необходимо контролировать положение начала общей системы координат, вокруг осей которой выполняется поворот. Напомним, что начало системы координат может занимать любое место в схеме и даже вне ее, а перенос в нужный узел выполняется функцией **Перенос начала системы координат в заданный узел** в разделе **Узлы и Элементы** (если узла нет, его можно создать).

Несмотря на кажущуюся простоту, у этой операции есть много «подводных камней». При выполнении поворота группы необходимо следить за тем, чтобы не возникало пересечений поворачиваемых элементов с неподвижной частью схемы, для пластинчатых элементов возможно изменение формы и потеря плоскостности, а неправильное назначение точки начала координат может привести к неожиданному результату.

### Масштабирование вдоль заданной прямой

Эта операция используется для изменения размеров расчетной схемы или ее фрагмента, заданного путем отметки узлов, вдоль указанного направления. Направление масштабирования определяется прямой, проходящей через два узла. Для выполнения масштабирования следует активировать в диалоговом окне нужную опцию, ввести коэффициент масштабирования (положительное число) и нажать кнопку **ОК**. Если выбрать курсором первый узел прямой, определяющей направление масштабирования, и протянуть резиновую нить до второго узла, масштабирование будет выполнено после фиксации второго узла. При назначении прямой не обязательно, чтобы определяющие ее узлы принадлежали набору узлов, для которого выполняется масштабирование. Указанная прямая определяет только направление.

Не забудьте проконтролировать результаты выполнения операции, так как возможны пересечения элементов, а также нарушения их формы.

### Масштабирование в заданной плоскости

Работа с этой операцией аналогична предыдущей. Масштабирование выполняется для всей схемы или выбранной группы узлов в плоскостях, параллельных заданной плоскости. Рекомендуется следующий порядок действий.

Для всей схемы:

- активировать в диалоговом окне опцию масштабирования в заданной плоскости;
- ввести коэффициент масштабирования;
- нажать кнопку **ОК**;
- выбрать на схеме три узла, лежащих в плоскости масштабирования.

После выбора третьего узла масштабирование выполняется автоматически.

Для группы узлов:
- выбрать (отметить) на схеме узлы, для которых выполняется масштабирование;
- вызвать режим геометрических преобразований;
- активировать в диалоговом окне опцию масштабирования в заданной плоскости;
- ввести коэффициент масштабирования;
- нажать кнопку **ОК**;
- выбрать на схеме три узла, лежащих в плоскости масштабирования или параллельной ей плоскости.

После отметки третьего узла масштабирование выполняется автоматически.

### Зеркальное отражение по заданной оси

Эти операции выполняют отражение всей схемы или ее части, выделенной как группа отмеченных узлов, зеркально вдоль выбранной оси. Как и в предыдущих случаях, предупреждаем об опасностях, связанных с возможным изменением направления местных осей элементов.

После геометрических преобразований полезно выполнить экспресс-анализ расчетной схемы (кнопка  в разделе **Управление инструментальной панели**), в котором предусмотрен поиск стержневых элементов нулевой длины и пластинчатых элементов нулевой площади.

### Масштабирование (полное)

Здесь выполняется масштабирование схемы или ее части, выделенной как группа отмеченных узлов, по всем направлениям вдоль осей общей системы координат в соответствии с заданным коэффициентом масштабирования.

Масштабирование будет выполнено автоматически после нажатия кнопки **ОК** в диалоговом окне.

### Примеры выполнения геометрических преобразований

Рассмотрим несколько примеров использования геометрических преобразований, связанных с операциями поворота, масштабирования и зеркализации.

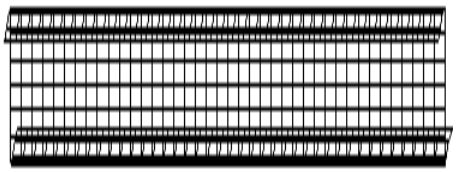


Рис. 5.17-2. *Исходная схема балки*

**Пример 1**

Операцию поворота рассмотрим на примере Z-образной балки, которую получим из исходной схемы на рис. 5.17-2.

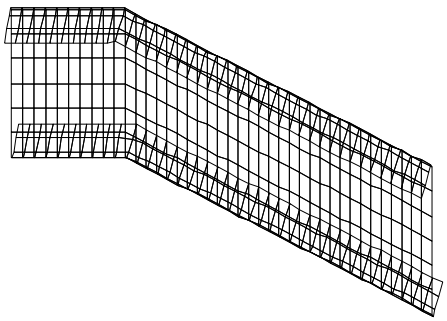


Рис. 5.17-3. *Схема балки после выполнения поворота группы узлов на* 12°

«Изогнем» балку на 12° вокруг оси Z на расстоянии 10 м от левого края балки. Для этого требуется:
- перенести начало общей системы координат в один из узлов, лежащих на линии перегиба;
- выбрать узлы от линии перегиба до правого края балки;
- вызвать **Геометрические преобразования**;
- активировать операцию поворота вокруг оси Z на угол 12°;
- нажать кнопку **ОК**.

На рис. 5.17-3 приведена схема, полученная в результате выполнения описанных выше действий.

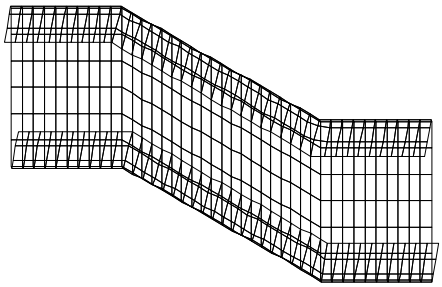


Рис. 5.17-4. *Схема балки после выполнения поворота другой группы узлов на* −12º

Повторим проделанные операции для последних десяти метров балки, развернув их на угол −12º. Результат приведен на рис. 5.17-4.

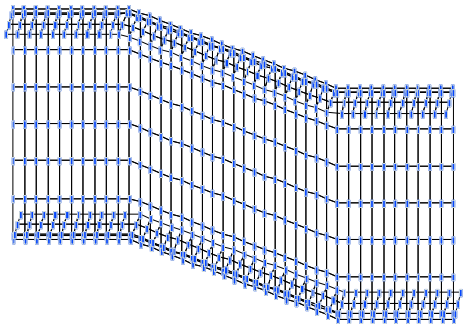


Рис. 5.17-5. *Схема балки в результате масштабирования вдоль заданной прямой*

**Пример 2**

На примере этой же балки рассмотрим операцию масштабирования вдоль заданной прямой. Увеличим высоту балки в два раза. Для этого необходимо:

- активировать **Геометрические преобразования**;
- установить операцию масштабирования вдоль заданной прямой;
- ввести коэффициент масштабирования, равный 2, и нажать кнопку **ОК**;
- соединить резиновой нитью два узла стенки, лежащие на одной вертикали.

После отметки второго узла схема будет автоматически преобразована (рис. 5.17-5).

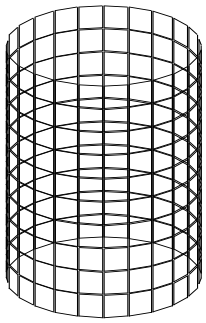


Рис. 5.17-6. *Исходная схема цилиндра*

**Пример 3**

Для иллюстрации возможностей масштабирования в заданной плоскости воспользуемся расчетной схемой цилиндра (рис. 5.17-6). Увеличим диаметр двух верхних и двух нижних поясов цилиндра в два раза.

Для этого необходимо:

- выбрать узлы указанных поясов;
- активировать **Геометрические преобразования**;
- установить операцию масштабирования в заданной плоскости;
- ввести коэффициент масштабирования 2;
- нажать кнопку **ОК**;
- выбрать на схеме три узла, лежащих в плоскости масштабирования (в данном случае в горизонтальной плоскости).

Операция будет выполнена после отметки третьего узла.

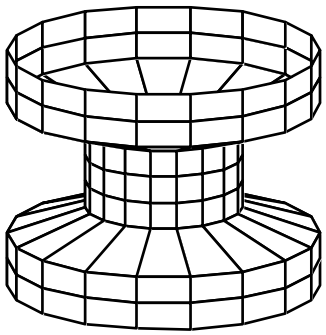
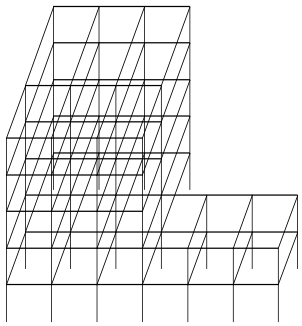


Рис. 5.17-7. *Схема цилиндра в результате выполнения масштабирования*

На рис. 5.17-7 схема-результат геометрических преобразований отображается с удалением линий невидимого контура.

Обратите внимание, что после выполнения операций масштабирования появились элементы трапециевидной формы. И если эти элементы в схеме-прототипе задавались как прямоугольные (тип 41), то их необходимо поменять на тип 44.



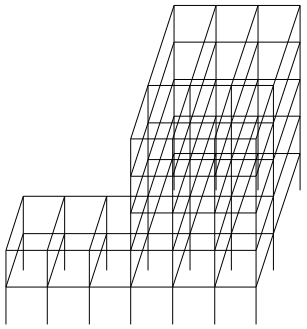
*а)*

**Пример 4**

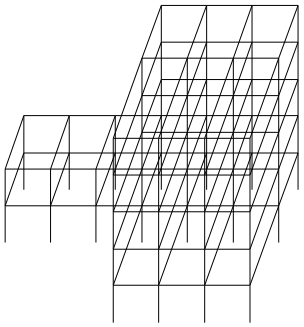
Пример иллюстрирует операции зеркализации. На рис. 5.17-8, *а* приведена исходная расчетная схема. Для нее последовательно выполним операции зеркального отражения по осям X, Y, Z (рис. 5.17-8, *б-г*).

Зеркализация допускает и работу с группой узлов, хотя это — весьма экзотическая операция, применимая только для отдельно стоящего фрагмента расчетной схемы.

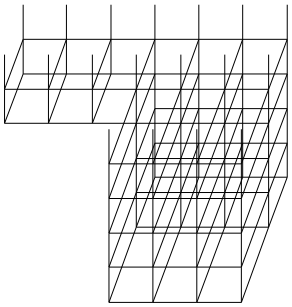


*б)*



*в)*



*г)*

Рис. 5.17-8. *Исходная расчетная схема* (*а*) *и результаты последовательного выполнения операции зеркализации по осям* X, Y, Z (*б–г*).

## 5.18. Задание сетки координационных (разбивочных) осей



Расчетную схему или ее часть можно формировать, используя для этого сетку координационных (разбивочных) осей. В программе предусмотрена возможность задания разбивочных осей, состоящих из нескольких участков, каждый из которых может иметь один из четырех типов: прямоугольный, прямоугольный, повернутый на заданный угол, косоугольный или полярный. Вертикальные отметки являются общими для всех участков и задаются один раз при описании первого участка.

Параметры осей задаются в многостраничном диалоговом окне **Задание сетки разбивки** (рис. 5.18-1).

На странице **Параметры сетки** назначаются вид осей и имя участка, а также задаются координаты точки привязки участка осей в общей системе координат модели. Правила отображения марок осей определяются активными маркерами. Кроме того, в зависимости от типа осей на этой странице задаются следующие данные:

- прямоугольная сетка, повернутая на заданный угол — угол поворота участка относительно точки его привязки (здесь и далее положительное направление — против часовой стрелки);
- косоугольная сетка — угол поворота участка сетки относительно точки его привязки и внутренний угол;
- полярная сетка — угол поворота оси X относительно точки привязки участка.

На страницах **Продольная разбивка** (рис. 5.18-2) и **Поперечная разбивка** задаются данные, необходимые для формирования осей, соответственно, вдоль направления Y и вдоль направления X. Разбивка вдоль оси Z, а также привязка отметки нижнего уровня задаются на странице **Отметки уровня**.

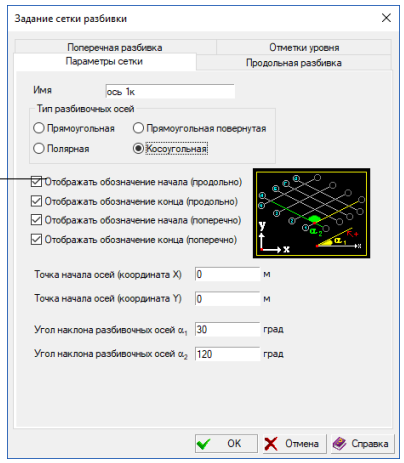



Рис. 5.18-1. *Диалоговое окно* **Задание сетки разбивки** (*страница* **Параметры сетки**)

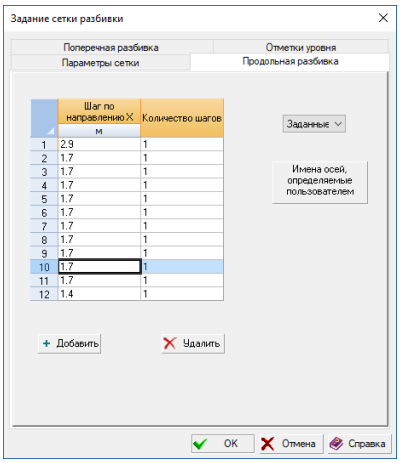



Рис. 5.18-2. *Диалоговое окно* **Задание сетки разбивки** (*страница* **Продольная разбивка**)

Имена разбивочных осей могут формироваться как автоматически, так и задаваться пользователем. По умолчанию принято, что продольные оси имеют цифровые марки в порядке возрастания от 1, а поперечные — буквенные в алфавитном порядке. Для изменения порядка, принятого по умолчанию, используется выпадающий список на страницах продольной и поперечной разбивки. Список включает три позиции «1, 2, 3…», «А, Б, В…» и «Заданные». Например, если выбрать в списке позицию «А, Б, В…» для продольных осей, не меняя ее для поперечных, то и те и другие оси будут маркироваться одинаково — буквами в алфавитном порядке.

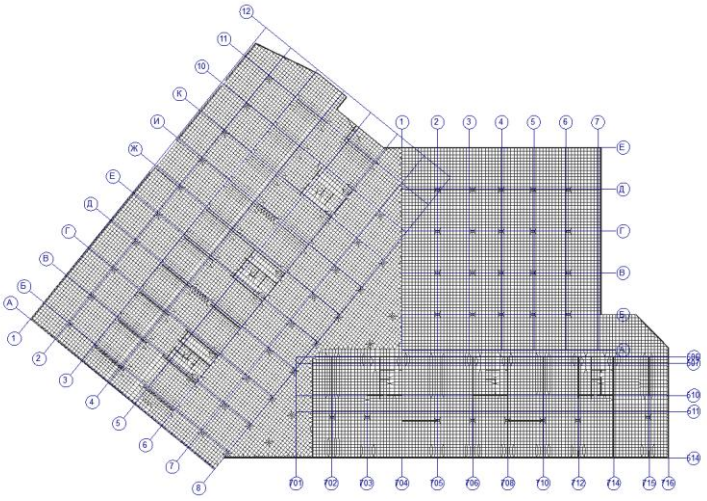


Рис. 5.18-3. *Фрагмент расчетной схемы с координационными осями*

Для назначения порядка маркировки, отличного от принятого по умолчанию, следует в диалоговом окне **Имена разбивочных осей**, которое вызывается нажатием кнопки **Имена осей, определяемые пользователем** (рис. 5.18-5), задать новые имена, которые могут включать до трех символов. Позиция «Заданные» установится автоматически, если были внесены какие-либо изменения в «стандартную» маркировку осей.

Для управления отображением осей используется фильтр  — **Отображение разбивочных осей**. Операции управления отображением описаны в разд. 10.2. Здесь следует отметить, что в программе предусмотрены различные варианты вывода осей: все участки одновременно или в любой их комбинации, целиком или с выбором фрагмента любого из участков и др.

Для того чтобы задать новый участок осей, следует активировать операцию **Задание сетки разбивочных осей**  и повторить описанные выше действия в одноименном диалоговом окне. В момент открытия окна в нем будут отображаться данные последнего из введенных участков сетки. Их следует заменить новой информацией.

Для корректировки параметров ранее заданного участка сетки осей следует активировать операцию задания сетки, используя для этого стрелку вызова выпадающего меню, стоящую справа от кнопки, и выбрать в этом меню раздел **Управление разбивочными осями**. Одноименное диалоговое окно (рис. 5.18-4) включает таблицу с перечнем заданных участков сетки разбивочных осей. Для внесения корректировок в параметры сетки следует выполнить следующие действия:

- отметить строку с корректируемой сеткой в таблице;
- нажать кнопку **Изменить**;
- в многостраничном окне **Задание сетки разбивочных осей** (рис. 5.18-1) внести нужные изменения;
- выйти из окна нажатием кнопки **OK**;
- после завершения работы по корректировке закрыть диалоговое окно **Управление разбивочными осями** нажатием кнопки **OK**.

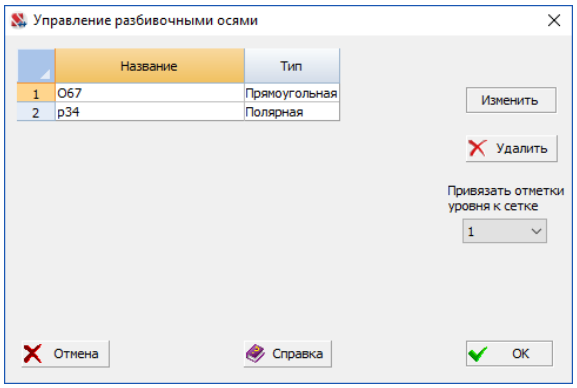



Рис. 5.18-4. *Диалоговое окно* **Управление разбивочными осями**

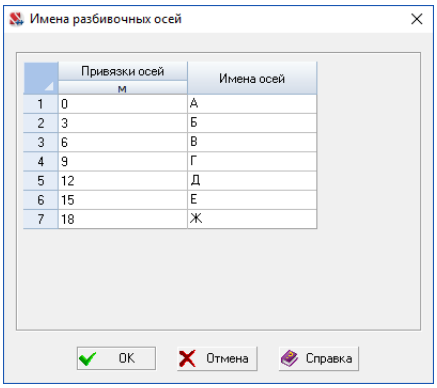



Рис. 5.18-5. *Диалоговое окно* **Имена разбивочных осей**

## 5.19. Ввод схемы на сетке координационных осей

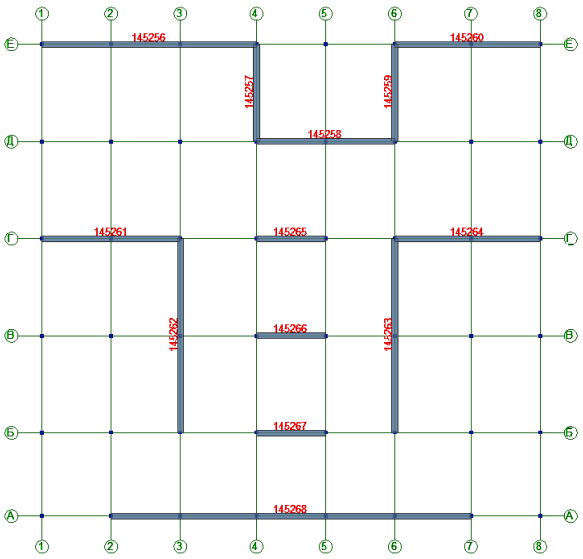



Рис. 5.19-1. *Стержневые элементы, введенные на сетке координационных осей*

Сетку координационных осей и вертикальные отметки можно использовать при задании геометрии расчетной схемы. Для этого необходимо привязать к сетке узлы. Кнопка вызова

операции генерации узлов  расположена в группе **Узлы** раздела **Узлы и Элементы** инструментальной панели. Операция позволяет ввести узлы на пересечении осей в заданной области сетки. При этом вертикальные отметки рассматриваются как координата осей Z. Добавленные узлы могут использоваться для всех предусмотренных в комплексе операций ввода и назначения. Они являются основой для построения области триангуляции, ввода стержневых, пластинчатых и объемных элементов, участвуют в операциях геометрических преобразований и сборки (рис. 5.19-1).

## 5.20. Копирование вдоль траектории

### Траектории



В этом разделе рассматриваются операции создания, корректировки и использования траекторий при формировании расчетной схемы.

Траектория представлена набором узлов, следующих в определенном порядке. Для удобства представления траектории в графическом редакторе узлы соединены отрезками, которые не рассматриваются как самостоятельные объекты и не влияют на характеристики расчетной схемы. Траектория является вспомогательным элементом (тип 1101), который может быть сформирован как при создании расчетной схемы, так и присоединен к схеме с использованием операции сборки.

Основное назначение траектории в процессе формирования геометрии расчетной схемы — это задание направления, в котором необходимо двигать копируемый прототип. Большинство остальных параметров совпадают с аналогичными в операциях копирования по прямой.

**Создание траектории и ее привязка к существующей модели**

При формировании траектории путем привязки ее узлов к существующим узлам расчетной схемы рекомендуется придерживаться следующей очередности выполнения операций:

- активировать операцию нажатием кнопки **Траектория** в инструментальной панели **Схема** и выбрать в выпадающем меню способ задания траектории, — путем выбора узлов в порядке их следования (**Создать новую траекторию**) или выбора стержневых элементов схемы, совпадающих с отрезками траектории (**Создать новую траекторию из отмеченных стержней**);
- в случае выбора первой операции в появившемся диалоговом окне (см. рис. 5.20-1) задать наименование траектории (поле **Имя**) и выйти из окна нажатием кнопки **ОК**;
- поочередно, в порядке их следования, с помощью «резиновой нити» выбрать на схеме узлы и нажать кнопку **ОК** в инструментальной панели **Схема** (курсоры для одновременного выбора нескольких узлов в виде «рамки» и «полигона» не используются, т.к. не обеспечивают в общем случае однозначного определения очередности их следования);
- аналогичный порядок действий будет при использовании операции **Создать новую траекторию из отмеченных стержней**; в диалоговом окне **Создание новой траектории** задается имя траектории, после выхода из окна отмечаются стержневые элементы и нажимается кнопка **ОК** в инструментальной панели **Схема** (очередность выбора стержней значения не имеет, т.к. предполагается, что отрезки, соединяющие соседние узлы траектории, образуют неразрывную ломанную).

**Особенности реализации**

Следует избегать использования конечными элементами и траекторией общих узлов. Это может привести к ситуации, когда смещение траектории влечет за собой изменение расчетной схемы. Если особенности расчетной схемы не ограничивают использование общих узлов схемы и траектории, то допускается задание траектории с учетом существующих узлов. В противном случае необходимо активировать маркер **Отделить узлы траектории от узлов схемы** в диалоговом окне **Создание новой траектории**, в результате чего в процессе задания траектории каждому узлу

расчетной схемы, использованному при создании траектории, будет соответствовать новый узел, принадлежащий только траектории.

В случае, когда выбраны стержневые элементы, не образующие неразрывную ломанную, программа выдает сообщение. Решение о создании на базе одного набора выбранных стержней нескольких траекторий принимает пользователь. При получении утвердительного ответа на запрос о возможности создания нескольких траекторий они формируются автоматически. Каждая траектория получает имя, заданное при активации операции, дополненное номером в порядке создания элемента. Исходное имя получает первая по очередности создания траектория.

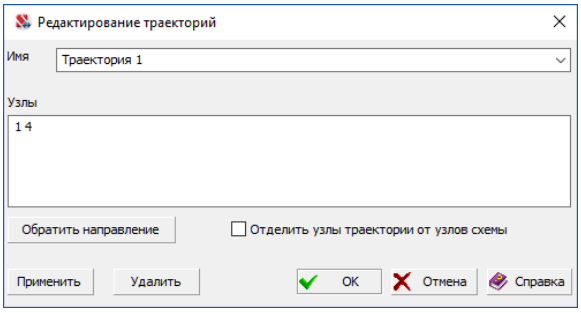



Рис. 5.20-1. *Диалоговое окно* **Редактирование траекторий**

### Копирование схемы с использованием траектории в качестве «направляющей»

Важным свойством траектории является возможность использовать ее в качестве «направляющей», которая указывает направление копирования. Аналогично другим операциям копирования, копирование вдоль траектории позволяет порождать одномерные элементы из выбранных узлов, двухмерные — из стержней и трехмерные — из двухмерных (оболочечных) элементов. Кроме того, при копировании вдоль траектории, предусмотрена возможность изменения размера копии в большую или меньшую сторону в зависимости от соотношения между коэффициентами масштабирования в начале и конце траектории.

При активации операции копирования вдоль траектории следует придерживаться тех же правил, что и при копировании в направлении осей основной системы координат:

- вызов операции копирования схемы выполняется одноименной кнопкой из раздела **Схема**;
- в выпадающем списке следует выбрать вид копирования — вся схема или только ее видимая часть;
- в диалоговом окне **Копирование схемы** (рис. 5.20-2) следует активировать маркер **Копирование вдоль траектории**, задать имя траектории, выбрав его из списка траекторий, заранее присоединенных к проекту;
- если в процессе копирования необходимо изменять размеры каждой очередной копии, то следует задать коэффициент масштабирования ($K_s$), отличный от единицы. Размеры копии будут меняться в большую ($K_s > 1$) или меньшую сторону ($K_s < 1$) пропорционально пройденному пути, если активен маркер **Размер шага**, или количеству выполненных шагов, вдоль траектории, если активен маркер **Количество шагов**.

При копировании схемы с выбранными (отмеченными) узлами и элементами выполняется преобразование типа выбранных объектов по следующим правилам:

- если в схеме-прототипе были выбраны узлы, из каждого такого узла порождается стержневой элемент, соединяющий его с узлом-аналогом на копии;
- если в схеме-прототипе были выбраны стержневые элементы, каждый выбранный стержень будет порождать пластинчатый элемент (трехузловой — тип 42 или четырехузловой — тип 44), размер которого в направлении копирования будет равен заданному шагу копирования;
- если в схеме-прототипе были выбраны пластинчатые элементы, каждый выбранный элемент будет порождать объемный элемент (тип 36, 33 или 34), размер которого в направлении копирования будет равен заданному шагу копирования (см. раздел 5.16).

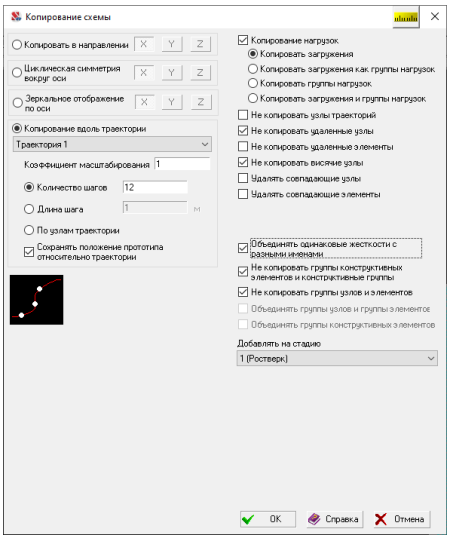



Рис. 5.20-2. *Диалоговое окно* **Копирование схемы**

Правила преобразования выбранных объектов будут выполняться и для любой их комбинации.

При всех вариантах копирования вдоль траектории предусмотрена возможность располагать копии с сохранением их начального положения относительно траектории. Для этого следует активировать одноименный маркер.

## 5.21. Графический редактор

Графический редактор, который вызывается нажатием кнопки  , позволяет задать расчетную схему стержневой конструкции или ее фрагмент с помощью набора графических операций, напоминающих среду 2D AutoCAD (AutoCAD Light). Авторы системы не ставили своей целью подменить такие признанные графические средства, как AutoCAD, Micro Station и им подобные. Цель была скромнее — дать возможность знатокам и любителям указанных графических систем работать в знакомой среде. Подробно графический редактор описан в разделе 34.7.

# 6. Операции с узлами и элементами

В процессе создания расчетной схемы часто возникает необходимость внести изменения в нее путем ввода новых или удаления существующих узлов и элементов, смены их положения в схеме, дробления элементов и др. Для выполнения перечисленных выше действий в комплексе предусмотрены различные операции, сосредоточенные в разделе инструментальной панели **Узлы и Элементы**.



Любая активированная операция с узлами и элементами будет активна до тех пор, пока мы не отменим ее нажатием кнопки  в инструментальной панели **Узлы и Элементы** или не выберем другую операцию.

## 6.1. Выбор узлов и элементов

В графической среде комплекса **SCAD** операции выполняются с выбранными (отмеченными) узлами и элементами. Реализовано несколько способов выбора, а именно: с помощью курсоров различного вида, из цветовых шкал, из таблиц и из списка сообщений.

Чаще всего объекты выбираются с помощью курсоров. Для выбора одного объекта используется курсор с мишенью. Если необходимо выбрать одновременно несколько объектов, то можно воспользоваться курсором в виде рамки или в виде полигона. Выбрать курсор можно в инструментальной панели **Управление выбором** (рис. 6.1-1) или из меню (рис. 6.1-2,*а*), которое появляется после нажатия правой кнопки мыши в рабочем поле окна.

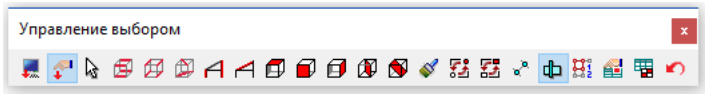



Рис. 6.1-1. *Инструментальная панель* **Управление выбором**

Кнопки инструментальной панели имеют следующие назначения:

 — **немедленное выполнение** — опция введена для опытных пользователей и активирует немедленное выполнение операций после выбора объектов. Распространяется на все виды операций, включая визуализацию, и обеспечивает их выполнение без подтверждения кнопкой **ОК** в инструментальной панели или клавишей **Enter**. При работе в этом режиме рекомендуется использовать фильтры отображения, соответствующие выполняемым операциям, что позволит оперативно контролировать корректность их выполнения;

 — **выполнение с подтверждением** — эта опция включена по умолчанию и активирует выполнение большинства операций только после их подтверждения кнопкой **ОК** в инструментальной панели или клавишей **Enter**;

 — **выбор вида курсора** — после нажатия этой кнопки появляется меню со списком доступных курсоров, в котором выбирается нужный;

 — **фильтры выбора горизонтальных (параллельных оси X, параллельных оси Y, непараллельных осям X,Y), вертикальных и наклонных стержней** соответственно — операции выбора будут распространяться только на стержневые элементы, положение которых в схеме соответствует активированным опциям (кнопки фильтров могут включаться в любых комбинациях, если все они «отжаты», то выбираются все объекты);

 — **фильтры выбора пластин, лежащих в плоскости XOY, XOZ, YOZ, а также вертикальных и наклонных** соответственно — операции выбора будут распространяться только на пластинчатые элементы, положение которых в схеме соответствует активированным опциям (кнопки фильтров могут активироваться в любых комбинациях, если все они «отжаты», то выбираются все объекты);

 — **восстановить исходное состояние фильтров ввода данных** — все фильтры сбрасываются в исходное состояние, принятое по умолчанию;

— **инвертировать выбор узлов** — используется для одновременного изменения состояния выбора всех видимых на экране узлов на противоположное (ранее выбранные узлы будут «погашены», а не отмеченные — выбраны);

— **инвертировать выбор элементов** — используется для одновременного изменения состояния выбора всех видимых на экране элементов на противоположное (ранее выбранные элементы будут «погашены», а не отмеченные — выбраны);

— **выбор элементов** — активируется выбор элементов;

— **выбор узлов** — активируется выбор узлов;

— **выбор объектов в схеме через таблицы** — эта опция позволяет выбирать объекты на расчетной схеме путем их указания в интерактивных таблицах (с исходными данными и результатами);

— **отображать в таблицах только выбранные объекты** — в интерактивных таблицах будет отображаться информация, относящаяся только к объектам, выбранным на расчетной схеме;

— **выбор объектов для отображения информации** — эта опция используется в тех случаях, когда в настройках установлен признак **Отображать информацию на схеме только для выбранных элементов и узлов**. В этом случае используется специальная операция выбора, не связанная с выполнением каких-либо действий с выбранными объектами, кроме вывода на схеме, относящейся к ним информации;

— **предыдущая отметка** — выбор ранее селектированных объектов.

Выбор курсора и настройка опций управления выбором могут быть выполнены и с помощью меню. Меню удобно пользоваться в тех случаях, когда выполняется только одно действие, такое, как выбор вида курсора или активация одной опции. Это связано с тем, что после выбора нужной позиции меню закрывается.

Точность позиционирования курсора для одиночного выбора определяется размером области экрана, которая накрывается мишенью курсора. Минимальный размер мишени приблизительно равен размеру принятого по умолчанию изображения узла на расчетной схеме. Как правило, такое «точное» указание используется на насыщенных расчетных схемах, где расстояние между узлами или размеры элементов соизмеримы с размером мишени. Значения 0,5, 1 и 1,5 (размер мишени увеличивается соответственно на 50, 100 и 150%) позволяют увеличить область позиционирования курсора при отметке объекта.

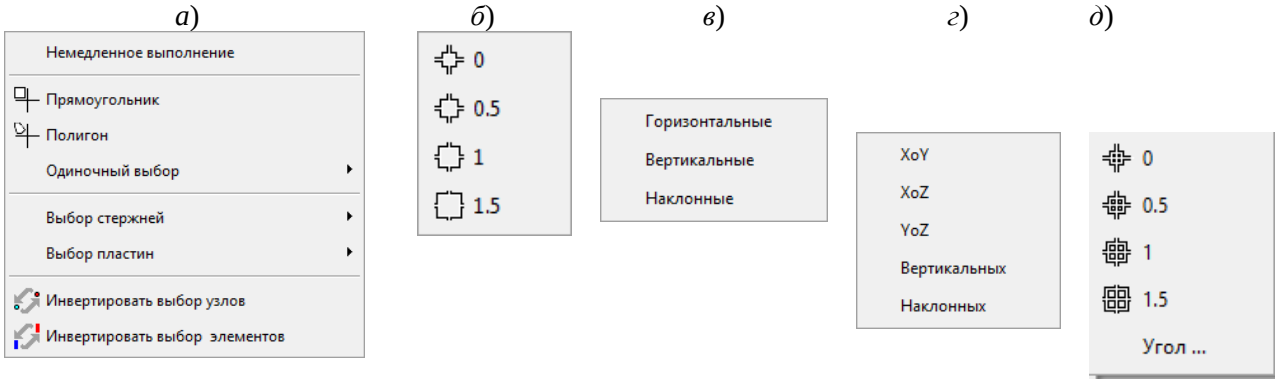



Рис. 6.1-2. *а) Меню управления курсорами;*
*б) выбор точности позиционирования курсора с мишенью; в) фильтры выбора стержней;*
*г) фильтры выбора пластинчатых элементов*
*д) выбор параметров связного выбора*

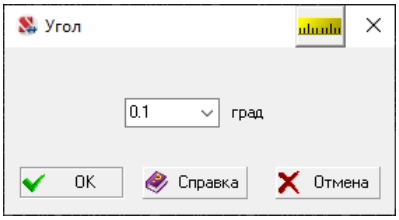
С помощью курсоров-рамок можно выбирать объекты, заключая их в прямоугольную рамку или в рамку произвольного очертания (полигон). Узлы будут выбраны, если они попали в область внутри рамки. Для выбора элементов необходимо, чтобы все их узлы попали в область рамки.

Исключение составляет элемент типа твердое тело, для выбора которого достаточно указать один из принадлежащих ему узлов или линию, соединяющую мастер-узел и один из ведомых узлов. Выбранные узлы и элементы маркируются красным цветом.

Связный выбор позволяет селектировать набор элементов (стержней или пластин), которые связаны между собой, и угол между каждыми двумя смежными элементами меньше заданной величины (пара элементов (E1,E2) считается связной, если можно найти такую последовательность элементов, которая начинается элементом E1 и заканчивается элементом E2 и в которой каждый последующий элемент имеет общий узел с предыдущим).

Для работы со связной селекцией нужно в контекстном меню выбрать соответствующий курсор и мышью указать на конечный элемент. Если выбрать стержневой/пластинчатый элемент, то при связном выборе будут использоваться только стержневые/пластинчатые конечные элементы.

Угол может быть изменен выбором пункта **Угол** в контекстом меню. Этот пункт активирует диалоговое окно, в котором можно ввести или выбрать в выпадающем списке нужную величину угла. Если угол равен нулю, то связная селекция позволяет автоматизировать создание конструктивных элементов. Использование достаточно больших углов позволяет производить селекцию элементов, которые расположены на криволинейной поверхности (например, выбрать все элементы, расположенные на поверхности конуса, сферы, ...).




При выборе узлов или элементов с помощью мыши можно использовать клавиши **Shift** и **Ctrl** на клавиатуре, которые меняют правила выбора узлов/элементов. При нажатой клавише **Shift** отметка ранее отмеченных узлов/элементов не снимается, а ранее неотмеченные узлы/элементы становятся селектированными. При нажатой клавише **Ctrl** отметка ранее отмеченных узлов/элементов снимается, а ранее не отмеченные узлы/элементы не селектируются.

При нажатии правой клавиши мыши на кнопках выбор узлов/элементов (  ) появляется меню, позволяющее селектировать узлы, принадлежащие выбранным элементам или селектировать элементы, примыкающие к выбранным узлам.

При выборе (отметке) узлов и элементов следует учитывать следующие правила работы курсоров:

- назначенная комбинация фильтров курсоров автоматически не сбрасывается, и фильтры будут находиться в активном состоянии до переустановки или отмены назначения. Текущее состояние фильтров отображается пиктограммами в инструментальной панели **Управление выбором**;
- установленный вид курсора будет активен до тех пор, пока не будет выбрана новая операция;
- при выборе объектов допускается многократно менять вид курсора;
- вторичное указание курсором на выбранный объект отменяет выбор.

Для отметки всех видимых на экране узлов или элементов используются соответственно операции **Инвертировать выбор узлов** и **Инвертировать выбор элементов**.

Если при выборе одного узла или элемента в мишень курсора попадает сразу несколько объектов, то все они приводятся в списках диалоговых окон **Узлы в мишени курсора** или **Элементы в мишени курсора** (рис. 6.1-3 и 6.1-4). Для выбора конкретного узла или элемента следует отметить его в соответствующем списке и нажать кнопку **Выбрать** (или сделать двойной щелчок мыши на нужной строке списка). Если несколько узлов имеют близкие, но не равные координаты, то выбор нужного узла следует выполнять по значениям его координат, которые отображаются в соответствующих полях группы **Координаты узла**. Координаты узлов отображаются в полях вывода с точностью и в единицах измерения, установленных на странице **Единицы измерения** диалогового окна **Параметры** (см. раздел 0), и могут быть изменены.

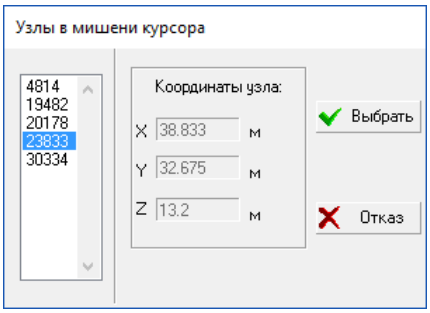



Рис. 6.1-3. *Диалоговое окно* **Узлы в мишени курсора**

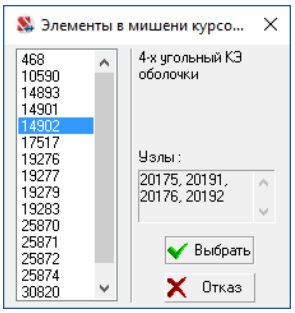



Рис. 6.1-4. *Диалоговое окно* **Элементы в мишени курсора**

## 6.2. Операции с узлами



Операции с узлами вызываются из раздела **Узлы** (рис. 6.2-1) инструментальной панели **Узлы и Элементы**.

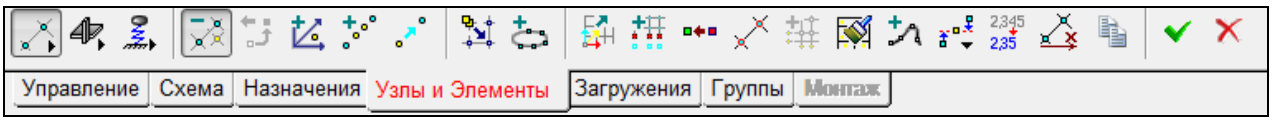



Рис. 6.2-1. *Раздел* **Узлы**
*инструментальной панели* **Узлы и Элементы**

В комплексе реализованы следующие операции для работы с узлами:

 — удаление узлов;

 — восстановление удаленных узлов;

 — ввод узлов;

 — ввод дополнительных узлов между узлами;

 — перенос узлов;

 — объединение совпадающих узлов;

 — генерация узлов по дуге;

 — перенос начала координат;

 — ввод узлов на заданном расстоянии от отмеченных;

 — замена узла в элементах;

 — отметка (выбор) узлов;

 — генерация узлов в точках пересечения разбивочных осей;

 — упаковка данных;

 — генерация образующей по формуле;

 — перенос узлов в заданную плоскость;

 — округление координат узлов;

 — перенумерация узлов;

 — копирование свойств узла.

Для отображения узлов на расчетной схеме используется кнопка фильтров **Узлы**  .

## Ввод узлов



Рассматриваемая операция позволяет ввести один или несколько узлов, расположенных на одинаковом расстоянии один от другого, задав их координаты. Исходные данные задаются в диалоговом окне **Ввод узлов**, которое появляется на экране после активации операции (рис. 6.2-2). Особенным свойством этого окна является то, что оно не закрывается и остается доступным все время, пока используется операция ввода.

При вызове операции **Ввод узлов** фильтр визуализации **Узлы**  для отображения узлов на экране включается автоматически.

Для ввода одного узла достаточно задать его координаты в полях левой части окна и нажать кнопку **Добавить**.

Наличие повторителя позволяет ввести сразу группу узлов. Для этого следует:

- в полях ввода координат задать координаты первого узла группы (X, Y, Z);
- активировать маркер режима **Повторить**;
- ввести количество повторений в поле N;
- в полях ввода приращений координат задать значения шага повторения в одном или нескольких направлениях (ΔX, ΔY, ΔZ);
- нажать кнопку **Добавить**.

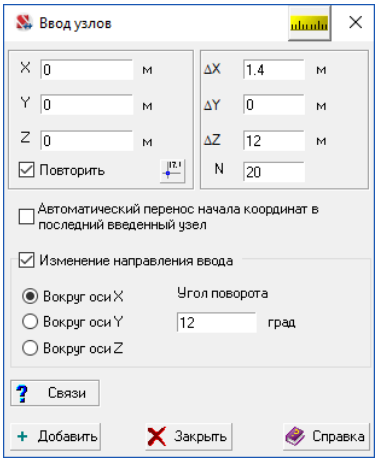



Рис. 6.2-2. *Диалоговое окно* **Ввод узлов**

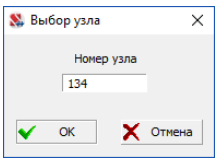



Рис. 6.2-3. *Диалоговое окно выбора узла*

Ввод узлов выполняется в осях общей системы координат расчетной схемы. Опция **Автоматический перенос начала координат в последний введенный узел** переносит начало системы координат, и новый отсчет координат идет от этого узла.

Имеется возможность задать узлы, лежащие на прямой, положение которой определяется координатами первого узла и приращением этих координат. Кроме того, возможен поворот этой прямой вокруг одной из осей общей системы координат. Центр вращения лежит в начале общей системы координат. Изменение направления ввода узлов активируется одноименной опцией и позволяет разворачивать узлы на заданный угол вокруг указанной оси общей системы координат. Если группа узлов вводится с использованием повторителя, то все узлы группы будут лежать на прямой, проходящей через начало координат и развернутой на заданный угол.

Одновременно с вводом в узлах могут назначаться связи. Для этого используется одноименная кнопка, нажатие на которую вызывает диалоговое окно **Связи** (см. раздел 7.4).

Операция выбора координат узла  позволяет получить координаты узла, указав его номер в поле **Номер узла** диалогового окна **Выбор узла** (рис. 6.2-3), и используется в тех случаях, когда отсчет приращений идет от ранее введенного узла. После выхода из этого окна координаты узла появятся в полях ввода **X**, **Y**, **Z**.

## Удаление узлов



Для удаления узлов необходимо:

- активировать операцию **Удаление узлов**;
- выбрать на расчетной схеме удаляемые узлы (выбранный узел окрашивается красным цветом);
- нажать кнопку **ОК** в разделе инструментальной панели **Узлы** или клавишу **Enter**.

Одновременно с удалением узлов будут удалены и примыкающие к ним элементы. Если ошибочно удаленным оказался «не тот» узел, его можно восстановить, воспользовавшись операцией **Отменить**.



**Несмотря на то, что кнопка ОК применялась уже неоднократно, напомним, что для выполнения операции можно использовать только «свою» кнопку, т. е. установленную в соответствующем разделе инструментальной панели.**

## Восстановление удаленных узлов



Для восстановления удаленных узлов следует:

- активировать операцию, при этом автоматически включается фильтр, отображающий удаленные узлы на схеме;
- выбрать восстанавливаемые узлы (они окрасятся красным цветом);
- нажать кнопку **ОК** в разделе инструментальной панели **Узлы** или клавишу **Enter**.

Обратите внимание, что эта операция восстанавливает только узлы. В тех случаях, когда при удалении узлов были удалены связанные с ними элементы, их восстановление выполняется аналогичной операцией в группе кнопок **Элементы**.

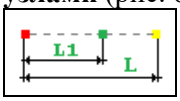
Удаленные узлы можно «высветить», т. е. сделать видимыми на схеме, не активируя операцию восстановления. Для этого используется кнопка фильтров  , после нажатия которой удаленные узлы выделяются желтым (или другим, назначенным в настройках) цветом.

Восстановление удаленных узлов возможно только в том случае, если после их удаления не выполнялась команда упаковки данных.

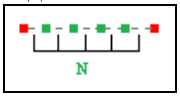
## Ввод дополнительных узлов между узлами



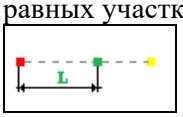
Эта операция позволяет добавить новые узлы на прямой, проходящей через два выбранных узла. После активации операции появляется диалоговое окно **Ввод дополнительных узлов между узлами** (рис. 6.2-4), в котором следует выбрать одну из пяти операций:



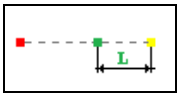
— ввод одного узла, делящего интервал между двумя выбранными узлами в заданном соотношении $L_1/L$;



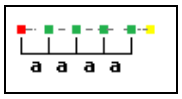
— ввод нескольких узлов, делящих интервал между двумя выбранными узлами на N равных участков;



— ввод одного узла на заданном расстоянии от первого выбранного узла;



— ввод одного узла на заданном расстоянии от второго выбранного узла.




— разбиение интервала между двумя выбранными узлами на равные участки заданной длины (остаток привязан к узлу, выбранному вторым).

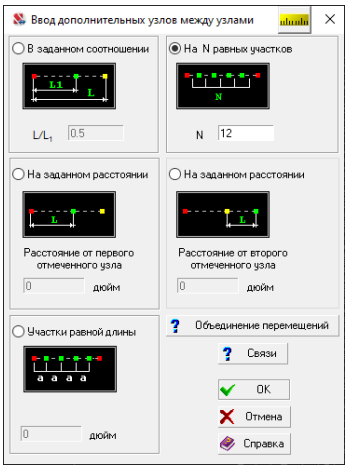



Рис. 6.2-4. *Диалоговое окно* **Ввод дополнительных узлов между узлами**

Для выбора операции необходимо активировать соответствующий маркер в окне и затем ввести числовые характеристики. После выхода из окна по нажатию кнопки **ОК** следует:

- выбрать первый узел (для первого, третьего, четвертого и пятого вариантов существенно, какой из узлов выбран первым);
- выбрать второй узел;
- нажать кнопку **ОК** в разделе инструментальной панели **Узлы** или клавишу **Enter**.

На пиктограммах операций, где важен порядок выбора узлов, первый выбранный узел помечен зеленым цветом, а второй — желтым. Одновременно с вводом в узлах могут назначаться связи. Для этого используется одноименная кнопка, нажатие на которую вызывает диалоговое окно **Связи** (см. раздел 7.4). Аналогично, с помощью кнопки **Объединение перемещений** все вновь созданные узлы и выбранные узлы могут быть объединены в группу объединения перемещений (выбор требуемых направлений производится в соответствующем диалоговом окне).

**С помощью этой операции вводятся узлы. Попадание новых узлов на стержневые элементы не вызывает их дробления. Для дробления стержней используются специальные операции инструментальной панели Элементы.**

## Перенос узлов



Операция используется для переноса одного узла в точку с заданными координатами (фактически, замена координат узла) или переноса нескольких выбранных узлов на заданный вектор.

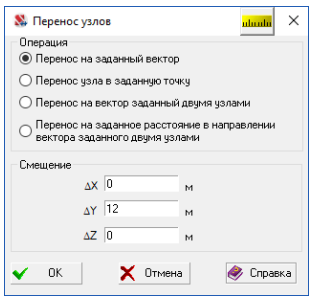



Рис. 6.2-5. *Диалоговое окно* **Перенос узлов**

При переносе нескольких узлов каждый *i*-й узел перемещается в пространстве в точку, определяемую путем сложения текущих координат этого узла ($X_i$, $Y_i$, $Z_i$) с приращениями, заданными по каждому направлению ($\Delta X$, $\Delta Y$, $\Delta Z$). В результате все выбранные узлы перемещаются на заданное расстояние. Параметры переноса назначаются в диалоговом окне **Перенос узлов** (рис. 6.2-5).

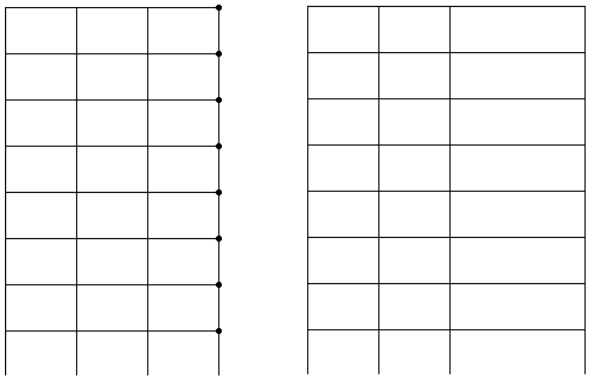


Рис. 6.2-6. *Пример использования операции переноса узлов на заданный вектор*

Для переноса узлов следует:

- нажать кнопку **Перенос узлов** в разделе **Узлы** инструментальной панели;
- в появившемся диалоговом окне **Перенос узлов** с помощью маркера выбрать вид операции: **Перенос на заданный вектор** или **Перенос узла в заданную точку** (при выполнении второго вида операции выполняется перенос одного узла);
- в зависимости от выбранной операции, задать приращения к координатам или новые координаты узла;
- выйти из окна по нажатии кнопки **ОК**;
- выбрать узлы или узел на схеме;
- нажать кнопку **ОК** в разделе инструментальной панели **Узлы** или клавишу **Enter**.

В примере, приведенном на рис. 6.2-6, отмеченные узлы передвинуты в положительном (совпадающем с направлением оси) направлении вдоль оси X.

Кроме того, можно использовать операцию переноса, в которой приращения координат определяются вектором, заданным двумя узлами. Для выполнения такого переноса следует активировать в диалоговом окне нужную опцию и нажать кнопку **ОК**. После выбора перемещаемых узлов в разделе инструментальной панели **Узлы** нужно нажать кнопку **ОК** (или клавишу **Enter).** Затем следует выбрать курсором первый узел вектора и протянуть резиновую нить до второго узла; перенос будет выполнено после нажатия кнопки **ОК** инструментальной панели.

Еще один вид операции переноса аналогичен предыдущему, но при этом вектор указывает только направление, а дистанция, на которую следует сместить узлы, задается пользователем.

**При использовании операции переноса узлов необходимо следить, чтобы в результате не происходили недопустимые изменения формы конечных элементов.**

## Объединение узлов с совпадающими координатами



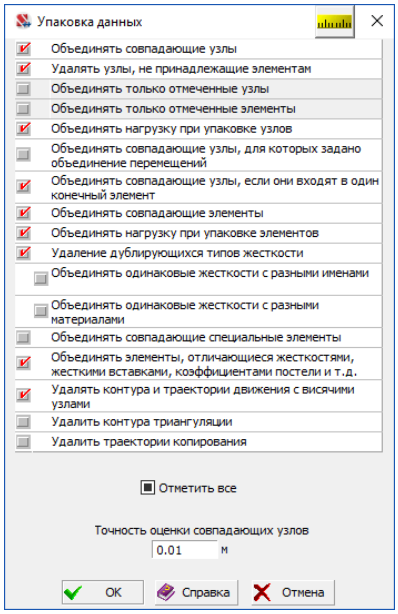



Рис. 6.2-7. *Диалоговое окно* **Упаковка данных**

В результате выполнения рассматриваемой операции из каждой группы узлов с совпадающими координатами в схеме останется только один узел, а остальные будут удалены. В элементах, примыкавших к удаленным узлам, номера удаленных узлов заменятся на номера узлов, остающихся в схеме.

Правила объединения назначаются в диалоговом окне **Упаковка данных**, которое появляется после активации операции и включает следующие опции:

- *Объединять только отмеченные узлы* — объединяются только предварительно выбранные (до активации операции) узлы;
- *Объединять нагрузку при упаковке узлов* — нагрузки со всех совпадающих узлов суммируются и прикладываются к узлу, который остается в схеме;
- *Объединять совпадающие узлы, для которых задано объединение перемещений* — узлы объединяются и признак объединения перемещений удаляется, если в схеме не осталось других узлов, входящих в эту же группу объединения перемещений;
- *Объединять совпадающие узлы, если они входят в один конечный элемент* — после удаления узла автоматической смены типа элемента не происходит.

Операция выполняется после выхода из диалогового окна нажатием кнопки **OK** и не требует подтверждения аналогичной кнопкой инструментальной панели.

Узлы считаются совпадающими, если расстояние между ними меньше значения оценки точности совпадения, установленной в диалоговом окне **Упаковка данных**.

## Генерация узлов по дуге



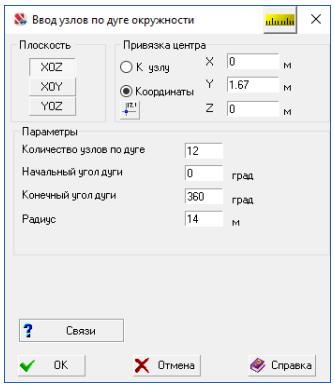



Рис. 6.2-8. *Диалоговое окно* **Ввод узлов по дуге окружности**

С помощью этой операции можно ввести узлы по дуге окружности, лежащей в заданной плоскости. Управление операцией и назначение параметров дуги выполняется в диалоговом окне **Ввод узлов по дуге окружности** (рис. 6.2-8), которое вызывается нажатием одноименной кнопки.

В этом окне назначается плоскость, в которой лежат новые узлы, количество узлов по дуге, углы начала и конца дуги, радиус окружности и ее центр. Центр может быть привязан как к узлу, так и к точке с заданными координатами.

Кнопка  позволяет активировать диалоговое окно (см. рис. 6.2-3), в котором можно ввести номер узла. После нажатия кнопки **ОК** координаты этого узла появятся в полях ввода **X**, **Y**, **Z** (при необходимости они могут быть изменены) и будут использованы в качестве координат центра.

В случае, когда центр задан координатами, новые узлы будут добавлены в схему сразу после нажатия кнопки **ОК** диалогового окна. Если же центр задан лежащим в узле, то следует выбрать этот узел и нажать кнопку **ОК** в инструментальной панели, после чего на схеме появятся новые узлы.

Одновременно с вводом в узлах могут назначаться связи. Для этого используется одноименная кнопка, нажатие на которую вызывает диалоговое окно **Связи** (см. раздел 7.4).

## Перенос начала системы координат



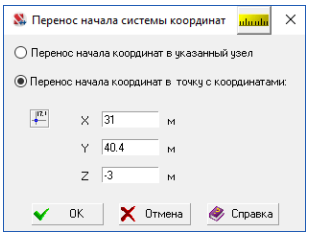



Рис. 6.2-9. *Диалоговое окно* **Перенос начала системы координат**

После активации операции на экране появляется диалоговое окно (рис. 6.2-9), в котором с помощью маркеров следует выбрать правило назначения точки, в которую переносится начало системы координат. Если выбран перенос в указанный узел, то после выхода из окна надо на схеме выбрать этот узел и нажать кнопку **ОК** в инструментальной панели.

Если перенос выполняется в точку с заданными координатами, то эти координаты задаются в соответствующих полях ввода диалогового окна, и перенос начала координат будет выполнен после выхода из окна нажатием кнопки **ОК**.

Кнопка  позволяет вызвать диалоговое окно (см. рис. 6.2-3), в котором можно ввести номер узла. После выхода из него координаты узла появятся в полях ввода **X**, **Y**, **Z**, и будут использованы в качестве нового начала координат.

Эта операция часто используется при выполнении геометрических преобразований, например при повороте части схемы на заданный угол. Поскольку поворот выполняется вращением группы узлов (а значит — и присоединенных к ним элементов) вокруг *начала общей системы* координат, то результат будет зависеть от положения центра вращения.

## Ввод узлов на заданном расстоянии от отмеченных



Операция позволяет ввести новые узлы, каждый из которых будет находиться на заданном расстоянии от выбранных на схеме узлов-прототипов. После активации операции появляется диалоговое окно **Ввод узлов на заданном расстоянии от отмеченных**, в таблице которого задаются расстояния в виде приращений к координатам выбранных узлов и количество повторений (рис. 6.2-10). Если в таблице заполняется несколько строк, то заданные в них значения рассматриваются как приращения к координатам узлов, введенных по значениям предыдущей строки.

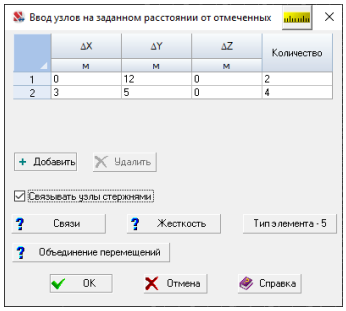



Рис. 6.2-10. *Диалоговое окно* **Ввод узлов на заданном расстоянии от отмеченных**

Для выполнения операции необходимо ввести в окне необходимую информацию, выйти из окна, выбрать на схеме узлы-прототипы и нажать кнопку **ОК** инструментальной панели.

Одновременно с вводом в узлах могут назначаться связи. Для этого используется одноименная кнопка, нажатие на которую вызывает диалоговое окно **Связи** (см. раздел 7.4). Аналогично, с помощью кнопки **Объединение перемещений** могут быть созданы группы объединения перемещений (выбор требуемых направлений производится в соответствующем диалоговом окне). При этом каждый выбранный узел породит “свою” группу объединения.

Если узлы должны быть связаны стержнями, то следует активировать одноименный маркер. При этом в окне становятся доступными кнопки **Жесткость** и **Тип элемента**, нажатие которых открывает соответствующие диалоговые окна для задания жесткостных характеристик и типа элемента (см. главу 7).

Новые строки вводятся в таблицу нажатием кнопки **Добавить**. Выбранные строки удаляются кнопкой **Удалить**.

**Полностью нулевая строка рассматривается как ввод приращений, равных нулю, что приведет к появлению совпадающих узлов.**

## Замена узла в элементах



С помощью этой операции для всех элементов, примыкающих к узлу, выполняется замена этого узла на другой.

Первым следует выбрать заменяемый узел (маркируется красным цветом), а затем узел, на который осуществляется замена (маркируется зеленым цветом), и нажать кнопку **ОК** инструментальной панели. После выполнения операции узел, помеченный красным, не удаляется.

**Если оба отмеченных узла принадлежат одному конечному элементу, то замена будет выполнена только после подтверждения пользователя, поскольку это приводит к появлению вырожденного элемента. Необходимо следить, чтобы в результате выполнения операции не происходили недопустимые изменения формы конечных элементов.**

## Отметка (выбор) узлов



Этой опцией можно воспользоваться в тех случаях, когда узлы необходимо (или удобно) выбрать до назначения операции с этими узлами, например, при выполнении копирования или геометрических преобразований. После активации этой опции для выбора узлов можно воспользоваться любым курсором. Выбор отменяется нажатием кнопки **Отказ** в разделе инструментальной панели **Узлы** или кнопкой **Сброс всех отметок** на панели фильтров.

Дубликат кнопки находится в инструментальной панели **Управление выбором** (см. раздел 6.1).

## Ввод узлов в точках пересечения разбивочных осей



Эта операция позволяет ввести узлы на пересечении разбивочных осей в заданной области сетки. При этом, отметки уровней рассматриваются как координаты узлов по оси Z. Введенные узлы могут использоваться для всех предусмотренных в комплексе операций ввода и назначения.

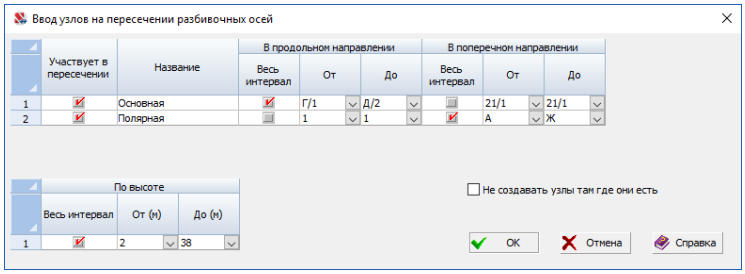



Рис. 6.2-11. *Диалоговое окно*
**Ввод узлов на пересечении разбивочных осей**

Управление вводом узлов выполняется в диалоговом окне **Ввод узлов на пересечении разбивочных осей** (рис. 6.2-11). Для каждой сетки и каждого направления осей конкретной сетки, включая отметки уровней, предусмотрена возможность ввода узлов в область, которая ограничивается заданными марками осей начала — левый список и конца — правый список.

Перед тем, как назначить область сетки, в которую вводятся узлы, следует отключить маркер **Весь интервал** в соответствующей этой сетке строке (рис. 6.2-11). Чтобы целиком исключить ввод узлов на пересечении осей сетки, следует отключить маркер **Участвует в пересечении**.

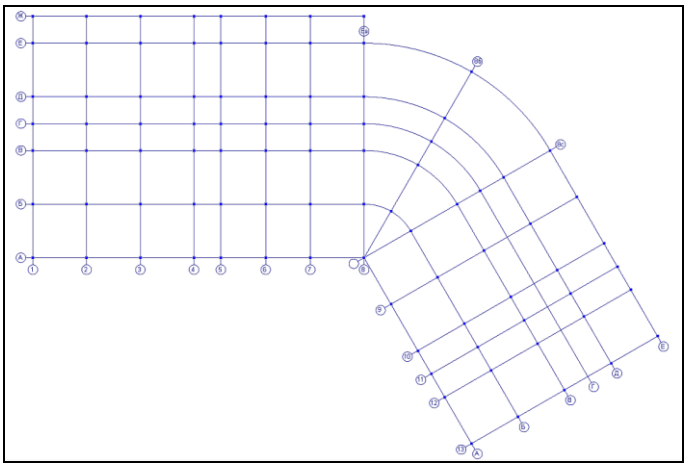


Рис. 6.2-12. *Координационные оси с узлами в точках пересечения осей*

Чтобы исключить появление узлов-дублеров (совпадающих узлов) на пересечении осей, следует активировать маркер **Не создавать узлы там, где они есть**.

## Генерация образующей по формуле



С помощью этой операции выполняется генерация узлов по образующей, описываемой функцией *a = f(b)* и лежащей в одной из плоскостей общей системы координат. После активации операции появляется одноименное диалоговое окно (рис. 6.2-13), в котором вводится формула образующей, назначается плоскость, в которой будут лежать узлы, задаются начальное (**Нач.**) и конечное (**Кон.**) значения аргумента функции, а также количество узлов (**Кол.**) на образующей.

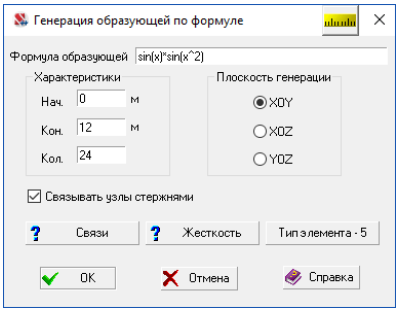



Рис. 6.2-13. *Диалоговое окно* **Генерация образующей по формуле**

В зависимости от выбранной плоскости генерации будут выполняться следующие функции:

- плоскость XOY — *y = f(x);*
- плоскость XOZ — *z = f(x);*
- плоскость YOZ — *z = f(y).*

Если узлы должны быть связаны стержнями, то следует активировать одноименный маркер. При этом в окне становятся доступными кнопки **Жесткость** и **Тип элемента**, нажатие которых открывает соответствующие диалоговые окна для задания жесткостных характеристик и типа элемента (см. главу 7).

Одновременно с вводом в узлах образующей могут назначаться связи. Для этого используется одноименная кнопка, нажатие на которую вызывает диалоговое окно **Связи** (см. раздел 7.4).

## Перенос узлов в заданную плоскость

При нажатии кнопки **Перенос узлов в заданную плоскость** появляется выпадающее меню (рис. 6.2-14), в котором следует выбрать нужную операцию.

Если на схеме нет выбранных узлов, то доступен только один пункт меню. С его помощью выполняется перенос выбранных узлов в плоскость, параллельную одной из плоскостей общей системы координат. Настройка операции выполняется в одноименном диалоговом окне (рис. 6.2-15).

Выбор координаты **X** в группе **Операция с координатой** означает перенос узлов в плоскость, параллельную **YOZ**, выбор **Y** — перенос в плоскость, параллельную **XOZ**, а выбор **Z** — в плоскость, параллельную **XOY**.

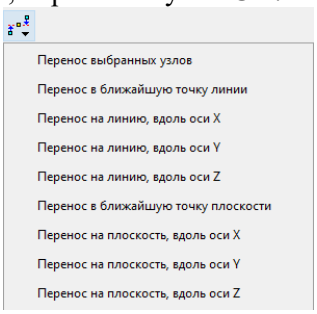



Рис. 6.2-14. *Меню* **Перенос узлов в заданную плоскость**

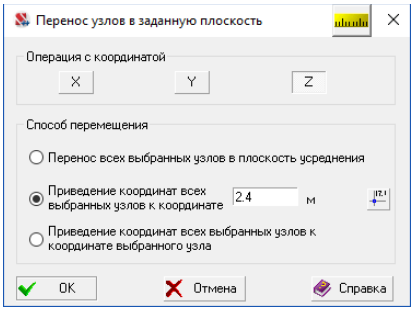



Рис. 6.2-15. *Диалоговое окно* **Перенос узлов в заданную плоскость**

В зависимости от активной опции в группе **Способ перемещения** перенос может выполняться тремя способами. В первом случае (активна опция **Перенос всех выбранных узлов в плоскость усреднения**) — в плоскость, которой принадлежит точка с усредненной координатой по заданному направлению. Во втором случае (активна опция **Приведение координат всех выбранных узлов к координате**) перенос выполняется путем приведения во всех выбранных узлах указанной координаты к заданному значению. Третий способ переноса (активна опция **Приведение координат всех выбранных узлов к координате выбранного узла**) позволяет преобразовать координаты выбранных узлов таким образом, что все они получат значение координаты, указанной в группе **Операция с координатой**, равное координате отмеченного узла. Для выполнения операции следует:

- выбрать на схеме узлы, у которых меняется координата;
- активировать операцию, выбрав в выпадающем меню (рис. 6.2-14) **Перенос выбранных узлов**;
- в диалоговом окне **Перенос узлов в заданную плоскость** (рис. 6.2-15) в группе **Операция с координатой** назначить координату;
- активировать маркер **Приведение координат всех выбранных узлов к координате выбранного узла**;
- выйти из диалогового окна, нажав кнопку **OK**, и выбрать на схеме узел с необходимым значением координаты;
- нажать кнопку **OK** в инструментальной панели.

Нажатие кнопки  приводит к появлению диалогового окна **Выбор узла** (см. рис. 6.2-3), что позволяет назначить узел, одна из координат которого используется в качестве координаты привязки выбранных узлов. Как правило, эта операция необходима в тех случаях, когда схема получена в результате импорта данных из графических систем. При этом часто возникают ситуации, когда узлы, которые должны лежать в одной плоскости, располагаются на самом деле в ее окрестностях. Следствием такой «неточности» могут являться, например, неплоские четырехузловые элементы.

Если в схеме предварительно отметить узлы, то при вызове операции **Перенос узлов в заданную плоскость** в выпадающем меню станут доступны преобразования — **Перенос на линию** и **Перенос в плоскость**. И для случая плоскости и для случая линии возможен перенос в

ближайшую точку (по нормали) или перенос вдоль выбранного направления глобальной системы координат. В случае выбора **Перенос на линию** следует с помощью мыши выбрать на схеме два узла, которые определяют прямую в пространстве и нажать кнопку **OK** инструментальной панели. В результате все отмеченные узлы будут перенесены на эту прямую. При выборе операции **Перенос в плоскость** на схеме следует выбрать три узла, не лежащие на одной прямой, которые определяют плоскость в пространстве. После нажатия кнопки **OK** все предварительно отмеченные узлы будут перенесены в эту плоскость.

## Округление координат узлов



Эта операция позволяет округлить координаты узлов расчетной модели с учетом заданной точности. После активации операции появляется одноименное диалоговое окно (рис. 6.2-16), в котором задается точность округления. После выхода из окна нажатием кнопки **OK** координаты узлов будут округлены до указанной точности. Если округление выполняется только для определенного набора узлов, то эти узлы следует отметить, а в диалоговом окне активировать соответствующий маркер.

Как правило, округление координат узлов может понадобиться после загрузки модели из графических редакторов или проектирующих систем.

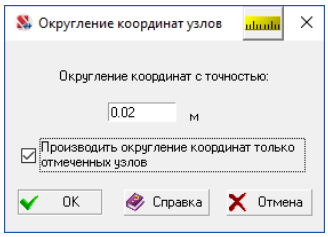



Рис. 6.2-16. *Диалоговое окно* **Округление координат узлов**



**Если модель включает плоскостные элементы, не лежащие в плоскостях основной системы координат, использование этой операции может привести к нарушению их формы (например, выходу отдельных узлов из первоначальной плоскости).**

## Перенумерация узлов



Операция позволяет перенумеровать узлы расчетной схемы в соответствии с выбранными пользователем правилами. Предусмотрена возможность произвести нумерацию таким образом, чтобы предварительно отмеченные узлы получили минимальные номера, а удаленные узлы оказались в конце списка. Для всех прочих узлов или только отмеченных (если выбран маркер **Перенумеровывать только отмеченные узлы**) правила перенумерации устанавливаются в таблице (рис. 6.2-17).

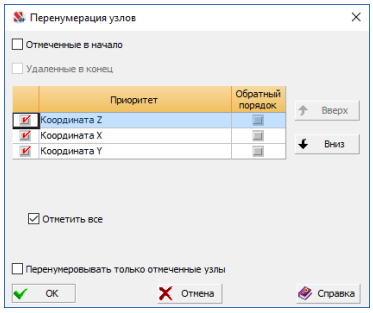



Рис. 6.2-17. *Диалоговое окно* **Перенумерация узлов**

Следует маркерами отметить те компоненты координат, которые будут учитываться при сортировке, а с помощью кнопок **Вверх** и **Вниз** установить приоритеты. Например, если таблица имеет вид, показанный на рисунке 6.2-17, то все отмеченные узлы получат первые номера, удаленные узлы получат последние номера, для всех прочих узлов минимальные номера получат узлы в порядке возрастания координаты Z; в том случае, когда узлы имеют одинаковые Z-координаты, перенумерация будет производиться в порядке возрастания X-координаты, и т.д. Для координат можно использовать маркер **Обратный порядок**, который позволяет производить перенумерацию не по возрастанию, а по убыванию значений.

## Копирование свойств узла



Операция используется в тех случаях, когда нескольким узлам расчетной схемы необходимо назначить свойства, аналогичные свойствам узла-эталона. Набор копируемых свойств включает:

- связи;
- объединения перемещений;
- принадлежность группам;
- условия примыкания тонкостенных стержней;
- нагрузки.

После активации операции появляется диалоговое окно **Копирование свойств узла** (рис. 6.2-18), которое содержит две группы элементов управления. Группа **Узел-эталон** обеспечивает выбор и визуализацию узла, чьи свойства копируются, а группа **Узлы-наследники** — выбор и визуализацию узлов, которые получают свойства элемента-эталона.

Копирование позволяет назначить «наследникам» определенные свойства эталона, выбор которых выполняется в диалоговом окне **Параметры копирования** (рис. 6.2-19). Окно вызывается нажатием одноименной кнопки после выбора «эталона» и «наследников».

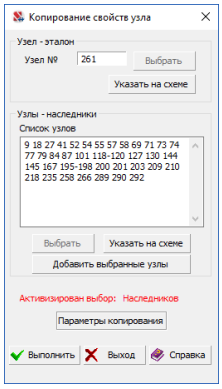



Рис. 6.2-18. *Диалоговое окно* **Копирование свойств узла**

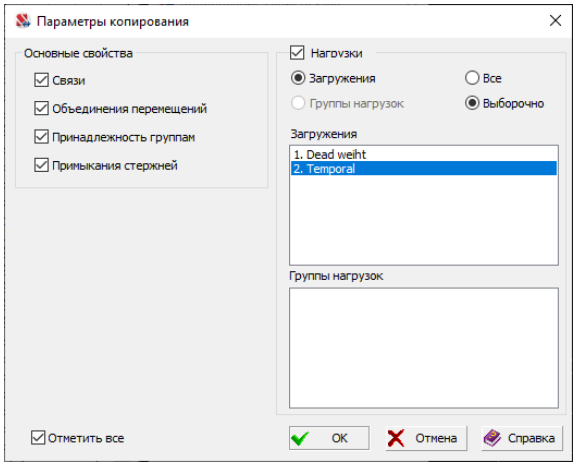



Рис. 6.2-19. *Диалоговое окно* **Параметры копирования**

В этом окне с помощью маркеров в группе **Основные свойства** назначается набор свойств. Кроме того, в группе **Нагрузки** можно назначить правила копирования нагрузок (загружения или группы, все или выборочно). При выборочном копировании нагрузок имена копируемых загружений или групп выбираются из одноименных списков. Рекомендуется следующий порядок действий при копировании:

– в диалоговом окне **Копирование свойств узла** в поле *Узел №* ввести номер узла-эталона и нажать кнопку **Выбрать**. Выбранный узел выделяется на схеме зеленым цветом. Если это действие удобнее выполнить указанием курсора, то нажать кнопку **Указание на схеме** и затем отметить курсором нужный узел;

- ввести номера узлов-наследников в поле *Список узлов* и нажать кнопку **Выбрать** для маркировки этих узлов на схеме. Если выбор удобнее выполнить указанием курсора, то перед этим действием следует нажать кнопку **Указание на схеме**.
- нажатием кнопки **Параметры копирования** вызвать окно назначения свойств узлам-наследникам и установить в нем набор копируемых свойств;
- после выбора всех узлов-наследников нажать кнопку **Выполнить** в диалоговом окне **Копирование свойств узла**.

## 6.3. Операции с элементами



Операции с элементами вызываются из раздела **Элементы** (рис. 6.3-1) инструментальной панели **Узлы и Элементы**.

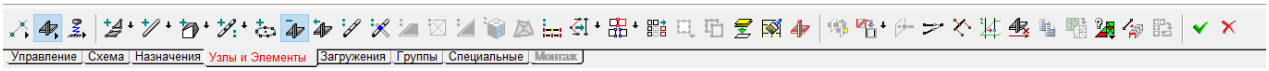



Рис. 6.3-1. *Раздел* **Элементы** *инструментальной панели* **Узлы и Элементы**

В режиме работы с элементами в поле инструментальной панели находится *группа кнопок*, с помощью которых выполняются следующие операции:

 — ввод пластин;

 — ввод стержней;

 — ввод объемных элементов;

 — ввод стержней с учетом промежуточных узлов;

 — генерация элементов по дуге;

 — удаление элементов;

 — восстановление удаленных элементов;

 — разбивка стержня;

 — дробление стержней в точке пересечения;

 — дробление четырехузловых пластин;

 — дробление четырехузловых пластин на трехузловые;

 — дробление трехузловых пластин;

 — дробление объемных элементов;

 — дробление пластин с учетом промежуточных узлов;

 — дробление стержней с учетом промежуточных узлов;

 — объединение стержней;

 — разделение элементов;

 — сдвиг элементов;

 — присоединение дополнительных узлов к элементам;

 — отсоединение всех дополнительных узлов от граней элементов;

 — объединение совпадающих элементов;

 — упаковка данных;

 — выбор элементов;

 — дробление пластин по линии пересечения;

 — объединение трехузловых элементов в четырехузловые;

 — продолжить стержень до пластины;

 — сопряжение стержней;

 — построение стержня, перпендикулярного выбранному;

 — дробление стержней полигоном;

 — перенумерация элементов;

 — копирование свойств элемента;

 — улучшить качество триангуляции;

 — оценка качества триангуляции;

 — создание пластинчатой модели стержня;

 — экспорт полигона из выделенных пластин.

## Ввод пластин



Эта операция позволяет ввести в схему (фактически, привязать к уже введенным узлам) трех- и четырехузловые пластинчатые элементы. В программе предусмотрена возможность вводить элементы с предварительно заданными характеристиками и с характеристиками, принимаемыми «по умолчанию».

Назначение характеристик выполняется в диалоговом окне **Ввод пластинчатых элементов** (рис. 6.3-2), которое появляется после инициации операции нажатием кнопки **Добавление пластины**. В указанном диалоговом окне предусмотрено задание следующих характеристик:

- количество узлов вводимых элементов (три или четыре);
- правило вычисления усилий (в центрах элементов или в центрах и узлах элементов);
- жесткостные характеристики (маркер **Жесткости** и соответствующая кнопка);
- направление выдачи усилий (маркер **Направление усилий** и соответствующая кнопка);
- тип элемента (кнопка **Тип элемента**);
- характеристики упругого основания (маркер **Упругое основание** и соответствующая кнопка).

Выбор узлов и ввод элементов выполняется после выхода из диалогового окна нажатием кнопки **OK**.

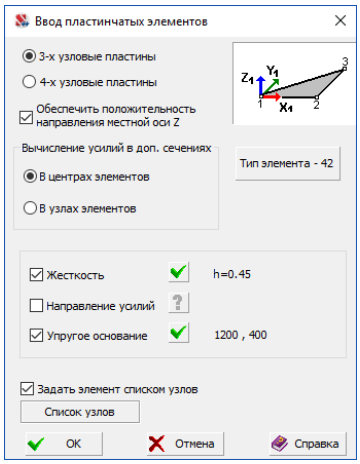



Рис. 6.3-2. *Диалоговое окно* **Ввод пластинчатых элементов**

Правила назначения указанных выше характеристик приведены в соответствующих разделах книги (см. главу 7). Характеристики будут действовать до момента следующего обращения к операции **Добавление пластины**. Часть характеристик может не задаваться при вводе, и в этом случае они будут приниматься «по умолчанию».

Если активен маркер **Обеспечить положительность направления местной оси $Z_1$**, то независимо от последовательности выбора узлов новый элемент будет добавлен так, что местная ось $Z_1$ будет иметь положительное направление (если узлы выбирались в последовательности, которая обеспечивает выполнение заданного условия, то это будет учтено при вводе элемента).

Если выбирается ввод с характеристиками, принимаемыми «по умолчанию», то работа начинается с нажатия на стрелку, стоящую справа от кнопки **Добавление пластины**. В выпадающем меню, которое появляется после нажатия стрелки, предлагаются следующие варианты ввода:

- Ввод 3-х узловых пластин с положительным направлением местной оси $Z_1$;
- Ввод 4-х узловых пластин с положительным направлением местной оси $Z_1$;
- Ввод пластин с положительным направлением местной оси $Z_1$;
- Ввод 3-х узловых пластин с учетом последовательности выбора узлов;
- Ввод 4-х узловых пластин с учетом последовательности выбора узлов;
- Ввод пластин с учетом последовательности выбора узлов.

Первые три варианта обеспечивают при вводе заданную ориентацию оси $Z_1$ и не гарантируют учет последовательности выбора узлов пользователем (при этом допускается использование курсоров в виде прямоугольной рамки или рамки произвольной формы для выбора узлов группой). Для второй тройки вариантов — групповой выбор не имеет смысла, и можно использовать только курсор одиночного выбора; если узлы были выбраны заранее, то их выбор будет отменен.

После выбора узлов элемент будет введен, если дважды нажать левую кнопку мыши или нажать кнопку **ОК** в инструментальной панели, или клавишу **Enter** на клавиатуре. По умолчанию приняты следующие характеристики элементов:

- тип элемента — определяется типом расчетной схемы и количеством узлов;
- жесткостные характеристики — не заданы;
- направление выдачи усилий — совпадает с направлением местной оси $X_1$;
- характеристики упругого основания — не заданы;
- вычисление усилий — только в центре элемента.

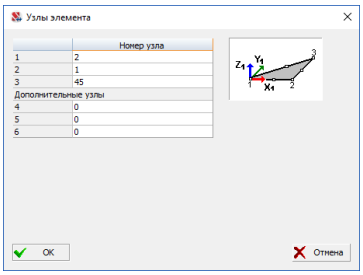



Рис. 6.3-3. *Диалоговое окно* **Узлы элемента**

Маркер **Задать элемент списком узлов** позволяет создать конечный элемент, не используя манипулятор мышь, а путем перечисления номеров узлов. Номера узлов можно ввести в диалоговом окне, которое активируется нажатием кнопки **Список узлов** (рис. 6.3-2). Если создается элемент с дополнительными узлами на сторонах, то в части таблицы, где перечислены дополнительные узлы нужно ввести 0, чтобы обозначить отсутствие дополнительного узла.

## Ввод стержней



Эта операция выполняется по тем же правилам, что и предыдущая, позволяя ввести в схему (фактически, привязать к уже введенным узлам) стержневые элементы. В программе предусмотрена возможность вводить элементы с предварительно заданными характеристиками и с характеристиками, принимаемыми «по умолчанию».

Для задания характеристик перед вводом элементов следует нажать кнопку **Добавление стержней,** указав курсором на пиктограмму с изображением стержня, и в появившемся диалоговом окне **Ввод стержневых элементов** (рис. 6.3-4) назначить:

- принцип ввода стержней (по одному или цепочкой);
- количество сечений, в которых вычисляются усилия;
- жесткостные характеристики (маркер **Жесткость** и соответствующая кнопка);
- шарниры (маркер **Шарниры** и соответствующая кнопка);
- тип элемента (кнопка **Тип элемента**);
- жесткие вставки (маркер **Жесткие вставки** и соответствующая кнопка).

Ввод элементов выполняется после выхода из диалогового окна нажатием кнопки **OK**.

Правила назначения указанных выше характеристик приведены в соответствующих разделах книги (см. главу 7). Характеристики будут действовать до момента следующего обращения к операции **Добавление стержней**. Часть характеристик может не задаваться при вводе, и в этом случае они будут приниматься «по умолчанию».

Если выбирается ввод с характеристиками, принимаемыми «по умолчанию», то работа начинается с нажатия на стрелку, стоящую справа от кнопки **Добавление стержней**. В появившемся выпадающем меню следует с помощью мыши выбрать принцип ввода стержней — по одному или цепочкой и приступить к вводу. По умолчанию приняты следующие характеристики элементов:

- тип элемента — определяется типом расчетной схемы;
- количество сечений, в которых вычисляются усилия — не задано (при расчете будет использовано значение, определенное в параметрах расчета);
- шарниры — отсутствуют;
- жесткостные характеристики — не заданы;
- характеристики упругого основания — не заданы;
- жесткие вставки — не заданы.

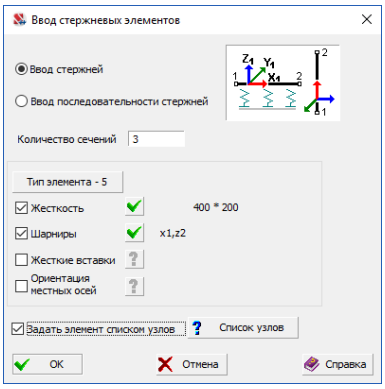



Рис. 6.3-4. *Диалоговое окно* **Ввод стержневых элементов**

Для ввода одного стержня следует установить курсор с мишенью в узел и нажать левую кнопку мыши, протянуть резиновую нить до второго узла и опять нажать кнопку мыши. Узел, который был выбран первым, будет назначен первым узлом стержня, т. е. точкой начала местной системы координат элемента.

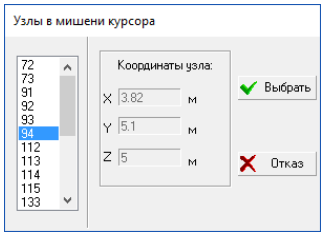



Рис. 6.3-5. *Диалоговое окно* **Узлы в мишени курсора**

При вводе последовательности стержней ввод цепочки будет продолжаться до тех пор, пока курсором не будет нажата кнопка инструментальной панели (или клавиша **Enter** на клавиатуре). После этого операция ввода стержней не сбрасывается и может быть продолжена, начиная с любого другого узла.

Операцию ввода цепочки можно прервать, если указать курсором на кнопку **Отказ** — в инструментальной панели или нажать клавишу **Esc** на клавиатуре.

Если в мишень курсора попадает более одного узла, то появляется диалоговое окно **Узлы в мишени курсора** (рис. 6.3-5). В этом окне следует выбрать из списка нужный узел и нажать кнопку **Выбрать**.

Маркер **Задать элемент списком узлов** позволяет создать конечный элемент не используя манипулятор мышь, а путем перечисления номеров узлов. Номера узлов можно ввести в диалоговом окне, которое вызывается нажатием кнопки **Список узлов** (рис. 6.3-2).

## Ввод объемных элементов



Аналогично пластинам и стержням, ввод объемных элементов можно выполнить, предварительно задав их параметры или приняв параметры по умолчанию. В любом случае перед началом ввода необходимо назначить тип элемента, который будет вводиться.

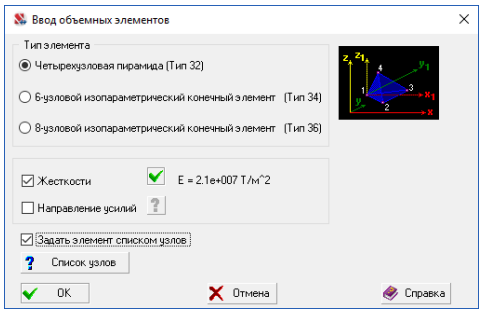



Рис. 6.3-6. *Диалоговое окно* **Ввод объемных элементов**

Для задания характеристик перед вводом элементов следует нажать кнопку **Добавление объемных элементов,** указав курсором на пиктограмму с изображением элементов, и в появившемся одноименном диалоговом окне (рис. 6.3-6) назначить:

- тип элемента (предусмотрен ввод элементов трех видов — четырехузловых пирамид (тип 32), а также шести- (тип 34) и восьмиузловых (тип 36) элементов);
- жесткостные характеристики (маркер **Жесткости** и соответствующая кнопка);
- направление выдачи усилий (маркер **Направление усилий** и соответствующая кнопка).

Ввод элементов выполняется после выхода из диалогового окна нажатием кнопки **OK**.

Правила назначения указанных выше характеристик приведены в соответствующих разделах книги (см. главу 7). Характеристики будут действовать до момента следующего обращения к операции **Добавление объемных элементов**. Часть характеристик может не задаваться при вводе, и в этом случае они будут приниматься «по умолчанию».

Если выбирается ввод с характеристиками, принимаемыми «по умолчанию», то работа начинается с нажатия на стрелку, стоящую справа от кнопки **Добавление объемных элементов**. В выпадающем меню следует с помощью маркера выбрать тип элемента и приступить к вводу. По умолчанию приняты следующие характеристики элементов:

- жесткостные характеристики — не заданы;
- направление выдачи усилий — вдоль осей общей системы координат.

Для ввода элемента достаточно выбрать на схеме узлы, количество которых должно соответствовать назначенному типу элемента, после чего элемент будет введен автоматически. Для выбора узлов используется только курсор с мишенью.

Маркер **Задать элемент списком узлов** позволяет создать конечный элемент не используя манипулятор мышь, а путем перечисления номеров узлов. Номера узлов можно ввести в диалоговом окне, которое активируется нажатием кнопки **Список узлов** (рис. 6.3-2).

## Удаление элементов



Для удаления элементов необходимо выбрать их на схеме (после чего они маркируются красным цветом) и нажать кнопку **OK** в инструментальной панели или клавишу **Enter** на клавиатуре.

Если в настройках параметров среды не выставлена опция, отменяющая удаление «висячих» узлов (узлов, не примыкающих к другим элементам схемы, кроме удаленных), то такие узлы удаляются вместе с элементами и их восстановление выполняется операцией **Восстановление удаленных узлов**.

Выбирать элементы можно любым типом курсора. При использовании курсора с мишенью — мишень следует установить в поле элемента и нажать левую кнопку мыши. Если в мишень попало несколько элементов, то их список будет выведен в специальном диалоговом окне **Элементы** в мишени курсора. После выбора в списке нужного элемента следует нажать кнопку **Выбрать**. При использовании курсора-рамки выбираются только те элементы, все узлы которых попали в прямоугольник или полигон. Вторичное указание на выбранный элемент отменяет выбор.

## Восстановление удаленных элементов



Эта операция дает возможность восстановить удаленные элементы, если после их удаления не выполнялась операция упаковки данных. Для восстановления удаленных элементов необходимо выполнить следующие действия:

- выбрать на схеме восстанавливаемые элементы (элементы маркируются красным цветом);
- нажать кнопку **ОК** в инструментальной панели.

В процессе восстановления элементов автоматически восстанавливаются и удаленные узлы, к которым они примыкают.

Выделить на схеме удаленные элементы можно с помощью фильтра **Удаленные элементы**  .

## Ввод стержней с учетом промежуточных узлов



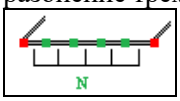
С помощью этой операции можно не только ввести новый стержень, но и автоматически разделить его на несколько элементов с учетом всех промежуточных узлов, лежащих по линии стержня. Операция выполняется как на плоских, так и на пространственных расчетных схемах по тем же правилам, что и ввод одного стержневого элемента или последовательности стержней.

Точность определения факта прохождения стержня через узел устанавливается в настройках параметров среды переменной, определяющей точность оценки совпадения узлов.

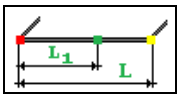
## Разбивка стержня



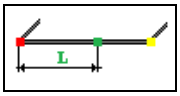
Эта операция используется для деления стержня на несколько стержней и позволяет выполнить разбиение тремя различными способами:



— N одинаковых участков (стержней);



— на два стержня в заданном соотношении;



— на два стержня заданного размера (в этом случае задается длина нового стержня).

Для двух последних способов разбиения можно указать от какого узла стержня (первого или второго) следует производить отсчет.

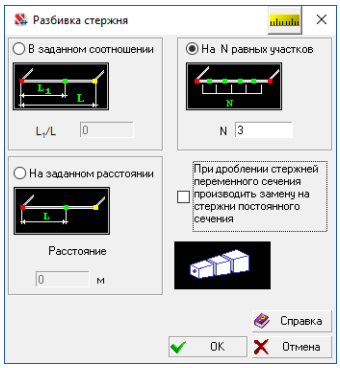



Рис. 6.3-7. *Диалоговое окно* **Разбивка стержня**

Для выбора способа разбиения надо активировать соответствующую опцию в диалоговом окне (рис. 6.3-7) и ввести числовые характеристики. После выхода из окна следует выбрать на схеме элементы и нажать кнопку **ОК** в инструментальной панели.

При вводе данных следует помнить, что при делении стержня в заданном соотношении значение $L_1/L$ должно быть положительным и меньшим единицы, а при делении на два стержня заданного размера — длина нового стержня не должна превышать длины исходного.

При выполнении операции все нагрузки, заданные на исходном стержне, будут перенесены на новые элементы.

Условия примыкания исходного стержня (шарниры и ползуны), а также жесткие вставки, лежащие вдоль стержня, будут перенесены на концы вновь образованной цепочки стержней.

Жесткие вставки из плоскости стержня будут корректно перенесены на вновь образованные элементы только в том случае, если они имеют одинаковую длину и лежат в одной плоскости.

При дроблении стержней переменного сечения можно выбрать два варианта — создавать новые стержни переменного сечения или получить новые стержни с постоянным сечением.

## Дробление стержней в точке пересечения



Эта операция позволяет разделить два пересекающихся стержня таким образом, что точка пересечения становится узлом, к которому примыкают новые стержни, полученные в результате пересечения. Для ее выполнения достаточно отметить нужные стержни и нажать кнопку **ОК** в инструментальной панели.

Условия примыкания исходного стержня (шарниры и ползуны), а также жесткие вставки, лежащие вдоль стержня, будут перенесены на концы вновь образованных стержней. Жесткие вставки из плоскости стержня будут корректно перенесены на вновь образованные элементы только в том случае, если они имеют одинаковую длину и лежат в одной плоскости.

## Объединение стержневых элементов



Операция позволяет объединить стержневые элементы, имеющие общий узел, или цепочку стержневых элементов, лежащих на одной прямой, в один элемент. Стрелка дополнительных возможностей открывает выпадающее меню, в котором можно выбрать следующие операции:

- Объединение двух стержневых элементов;
- Объединение стержней, лежащих на одной прямой;
- Замена стержней, лежащих на одной прямой, стержнем переменной жесткости.

По умолчанию принята операция объединения двух стержней.

После активации операции следует выбрать объединяемые стержни и нажать кнопку **ОК** в инструментальной панели.

Независимо от варианта выполнения операции сохраняются жесткие вставки и шарниры (при их наличии) в концевых узлах цепочки объединяемых стержневых элементов. Жесткие вставки и шарниры в других узлах игнорируются.

При объединении стержней, лежащих на одной прямой, производится учет заданных жестких вставок и, соответственно, проверяется непрерывность гибкой части при стыковке элементов. При операции объединения двух стержней их гибкие части могут не лежать на одной прямой.

Тип элемента, ориентация местных осей, жесткость (кроме создания стержня переменного сечения), упругое основание и величина преднапряжения сохраняются такими, как задано для элемента, примыкающего к первому узлу объединенного элемента.

При создании стержня переменного сечения необходимо, чтобы стержни в начале и конце цепочки имели одинаковый тип параметрического описания. Если это не выполнено, то назначается тип жесткости элемента, примыкающего к первому узлу. Жесткости промежуточных стержней игнорируются.

Равномерно-распределенные, сосредоточенные и трапециевидные нагрузки сохраняются. Если гибкие части элементов не лежат на одной прямой, то не гарантируется их полное соответствие.

Собственный вес, заданный для некоторых элементов цепочки, применяется для объединенного элемента.



**После объединения стержней следует проверить тип полученного элемента и ориентацию местных осей.**

**Температурная нагрузка, заданная на отдельные элементы цепочки, переносится с одного из элементов и подлежит контролю после выполнения операции объединения.**

## Ввод стержней по дуге



Эта операция используется для ввода стержневых элементов, примыкающих к узлам, лежащим на дуге окружности. Управление вводом выполняется в диалоговом окне **Ввод элементов по дуге окружности** (рис. 6.3-8). Исходные данные, необходимые для выполнения операции, включают:

- выбор плоскости, в которой лежат новые элементы (допускаются только плоскости, параллельные плоскостям основной системы координат);
- количество элементов по дуге окружности;
- значения углов начала и конца дуги (для полной окружности, например, это $0^0$ и $360^0$ или 0 и 6.28 радиан соответственно);
- радиус окружности;
- привязка центра окружности (к узлу или значения координат).

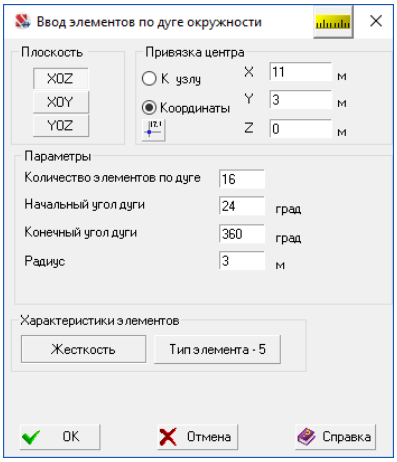



Рис. 6.3-8. *Диалоговое окно* **Ввод элементов по дуге окружности**

Если центр задается координатами, то новые элементы будут введены в схему автоматически после выхода из окна нажатием кнопки **OK**. Если центр лежит в узле, то после выхода из окна необходимо выбрать этот узел и нажать кнопку **OK** в инструментальной панели или клавишу **Enter** на клавиатуре.

Одновременно с вводом параметров дуги можно задать жесткости и тип элементов (кнопки **Жесткость** и **Тип элемента** соответственно).

Чтобы назначить центром окружности узел с определенным номером, следует воспользоваться кнопкой **Получить координаты узла с заданным номером**  и в открывшемся диалоговом окне **Выбор узла** (см. рис. 6.3-3) ввести его номер. Координаты этого узла появятся в полях ввода **X**, **Y**, **Z** и могут быть изменены.

## Выбор элементов



Эта операция эквивалентна одноименной операции в инструментальной панели **Управление выбором**. Выбор элементов будет выполняться с учетом состояния фильтров этой панели. Отменить операцию и выбор всех элементов можно нажатием кнопки **Отказ** в инструментальной панели или кнопкой **Сброс всех отметок** на панели фильтров отображения.

## Объединение совпадающих элементов



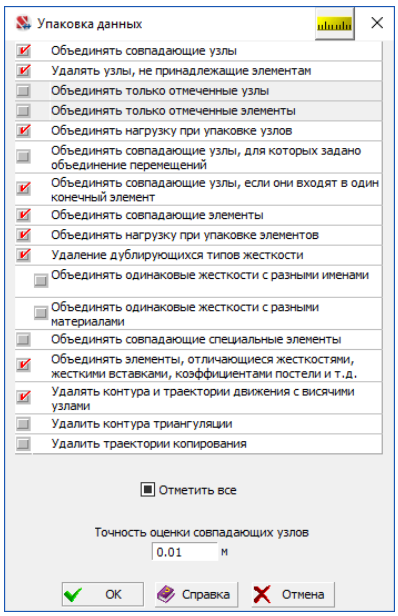



Рис. 6.3-9. *Диалоговое окно* **Объединение совпадающих элементов**

Операция позволяет исключить из схемы совпадающие элементы, т. е. такие элементы одного вида, у которых совпадают номера всех узлов. Правила объединения задаются в диалоговом окне (см. рис. 6.3-9).

В этом окне можно задать или отказаться от объединения специальных конечных элементов, удаления дублирующихся типов жесткостей, ... .

Если на схеме нет выбранных совпадающих элементов, то после активации операции объединение будет выполнено для всей схемы целиком, если есть — операция будет произведена только с выбранными элементами, при условии, что пользователь подтвердит это включением соответствующего маркера.

Для индикации на схеме совпадающих элементов используется кнопка фильтров  .

## Дробление четырехузловых пластин



Эта операция позволяет раздробить выбранные четырехузловые элементы на несколько элементов.

Исходные данные, необходимые для выполнения операции, задаются в диалоговом окне **Дробление пластин** (рис. 6.3-10) и включают количество дроблений граней элемента, лежащих вдоль направлений местных осей $X_1$ и $Y_1$. После выполнения операции в схеме могут появиться совпадающие узлы.

Если в окне включена опция **Упаковать совпадающие узлы на всей схеме**, то после выполнения дробления эта операция будет вызвана автоматически. В противном случае контроль наличия совпадающих узлов и их объединение берет на себя пользователь (см. раздел 6.2).

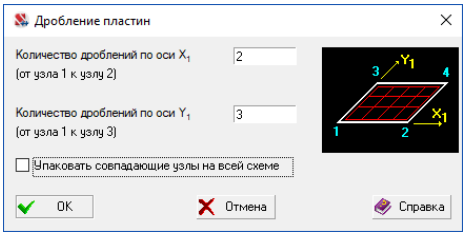



Рис. 6.3-10. *Диалоговое окно* **Дробление пластин**

Элементы с дополнительными узлами на сторонах при выполнении этой операции игнорируются.

## Дробление четырехузловых пластин на трехузловые



Операция используется для дробления четырехузловых элементов на трехузловые. Модель разбиения назначается в диалоговом окне (рис. 6.3-11), которое появляется после активации операции. Порядок работы — традиционный:

- активировать операцию;
- назначить в появившемся окне модель разбиения;

- выбрать на схеме нужные элементы;
- нажать кнопку **ОК** в инструментальной панели.

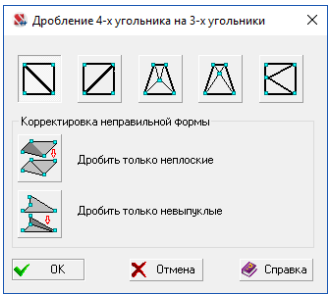



Рис. 6.3-11. *Диалоговое окно* **Дробление 4-х угольника на 3-х угольники**

Операция позволяет согласовать исходную сетку 4-х узловых элементов с сеткой, полученной путем дробления части элементов с коэффициентом 2. В этом случае у исходных элементов, лежащих на границе области сгущения сетки, на ребре появляется «свободный» узел. Если выбрать такие элементы и применить к ним модель разбиения  , то каждый из элементов будет разбит на три треугольника и сетки будут согласованы, как показано на рис. 6.3-12.

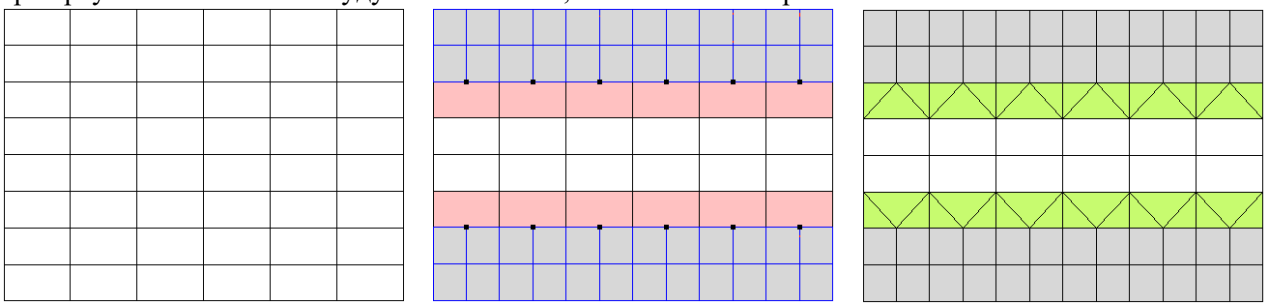


Рис. 6.3-12. *Пример увязки сеток конечных элементов с различным шагом разбиения*

Другим примером, в котором возникает необходимость дробления четырехузловых элементов на трехузловые является необходимость "исправить плохие" четырехугольные элементы. В этом случае можно воспользоваться опциями:

- дробить только неплоские;
- дробить только невыпуклые.

Если выбран один вышеупомянутый маркер, то операция будет выполнена только для тех выбранных элементов, которые обладают соответствующими свойствами.

Элементы с дополнительными узлами на сторонах при выполнении этой операции игнорируются.

## Дробление трехузловых пластин



Операция используется для дробления трехузловых элементов. При ее выполнении стороны выбранных треугольников разбиваются на равные отрезки в количестве, указанном в диалоговом окне **Дробление 3-х узловых пластин** (рис. 6.3-13).

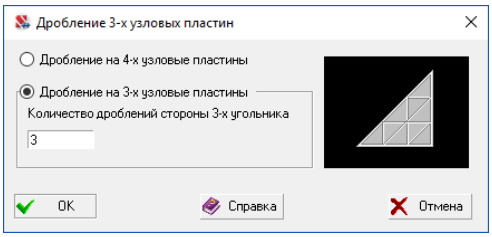



Рис. 6.3-13. *Диалоговое окно* **Дробление 3-х узловых пластин**

Кроме того, после выбора соответствующей опции в этом диалоговом окне может быть выполнена операция разбиения треугольного элемента на четырехугольные (из центра масс треугольника опускаются перпендикуляры на его стороны).

Элементы с дополнительными узлами на сторонах при выполнении этой операции игнорируются.

## Дробление объемных элементов



Операция предназначена для дробления объемных (3-х мерных) конечных элементов и обеспечивает сгущение сетки с разным шагом как в плоскости основания элементов, так и по высоте. В зависимости от типа элементов предусмотрены два вида дробления — по дополнительным узлам и на заданное количество шагов. Первый вид дробления выполняется для элементов типа 35 (15-ти узловая призма), 37 (20-ти узловой изопараметрический конечный элемент) и 38 (10-ти узловая пирамида), у которых предусмотрено наличие дополнительных узлов, и обеспечивает дробление только при наличии таких узлов. Для указанных элементов и всех остальных типов объемных элементов выполняется дробление на заданное количество шагов.

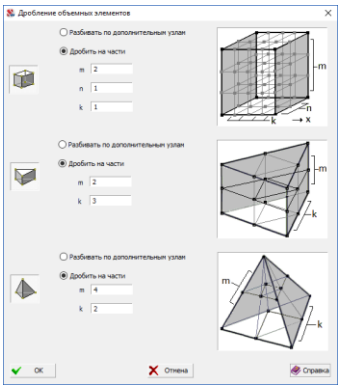



Рис. 6.3-14. *Диалоговое окно* **Дробление объемных элементов**

После вызова операции появляется одноименное диалоговое окно (рис. 6.3-14), в котором следует выполнить следующие действия:

- активировать кнопки-маркеры с изображением видов элементов, подлежащие дроблению;
- для каждого вида установить операцию дробления (**Дробить по дополнительным узлам** или **Дробить на части**);
- выйти из диалогового окна по кнопке **OK**;
- выбрать на схеме элементы;
- нажать кнопку **OK** в инструментальной панели.

## Дробление пластин с учетом промежуточных узлов



С помощью этой операции выполняется дробление пластинчатых элементов с учетом узлов, лежащих в их поле (включая узлы, попадающие на грани). Узел считается попавшим в поле элемента, если его расстояние до ближайшей грани не превышает значения точности оценки совпадающих узлов.

При выполнении операции не контролируется качество полученных конечных элементов. Контроль рекомендуется выполнить, воспользовавшись операцией **Качество триангуляции**, описание которой приведено ниже в этом же разделе.

Элементы, полученные в результате дробления, наследуют характеристики жесткости, коэффициенты постели, ориентацию осей выдачи усилий и нагрузки, заданные для исходного элемента.

## Разделение элементов



Эта операция используется в тех случаях, когда необходимо отделить один от другого соседние элементы, имеющие общие узлы (например, для моделирования деформационного шва или ввода упругих связей между соседними узлами этих элементов). Для выполнения операции должны быть выбраны узлы, через которые проходит «разрез», и элементы, которые отсоединяются от выбранных узлов.

Суть выполняемого действия такова, что на месте каждого выбранного узла появятся два узла с совпадающими координатами — исходный (выбранный узел) и новый узел. При этом к новому узлу будут присоединены только выбранные элементы.

Одновременно с разделением элементов предусмотрена возможность создания линейного шарнира вдоль линии разделения, моделируемого путем автоматического задания объединения перемещений по линейным направлениям между парами совпадающих узлов. Выбор вида операции (разделение или разделение с созданием шарнира) осуществляется в выпадающем меню, которое активируется нажатием стрелки, стоящей справа от кнопки вызова операции.

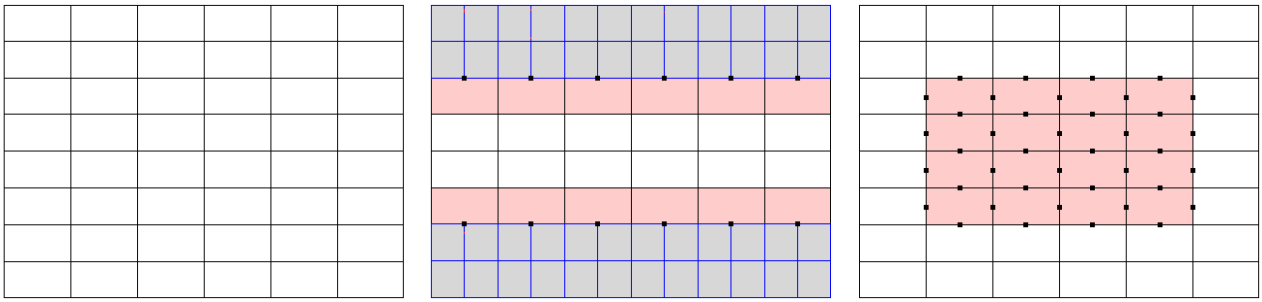
Для выполнения операции рекомендуется следующий порядок действий:

- активировать операцию разделения и выбрать элементы, которые будут отсоединены от выбранных узлов;
- нажать кнопку **Выбор узлов**  на инструментальной панели **Управление выбором** и выбрать узлы, по которым пройдет «разрез»;
- нажать кнопку **OK** в разделе **Элементы** инструментальной панели **Узлы и Элементы**.

## Присоединение дополнительных узлов к элементам



Операция позволяет присоединить по одному дополнительному (промежуточному) узлу к одной или нескольким граням пластинчатых элементов. Введение дополнительных узлов позволяет повысить качество результатов без сгущения сетки элементов, а также корректно увязать между собой конечные элементы расчетной схемы (рис. 6.3-15).



*а*) *б*) *в*)

Рис. 6.3-15. *Результаты применения операции* **Присоединение дополнительных узлов к элементам**

*а*) исходная схема; *б*) согласование сеток элементов с различным шагом разбиения; *в*) добавление узлов на грани выбранных элементов

Для присоединения дополнительных узлов тип конечного элемента должен быть заранее изменен на тип, соответствующий типу высокоточных конечных элементов, приведенных в описании библиотеки конечных элементов (см. главу 3). К таким элементам относятся 50 и 45 элементы оболочки, 27, 30 и 25 — балки-стенки, 20 и 15 — плиты, а также 35, 37, 38 — объемные.

После активации операции появляется меню, первый пункт которого — **Присоединение существующих узлов к граням элементов** предполагает присоединение к выбранным элементам существующих в схеме узлов, попавших на их грани. Если выбирается второй пункт меню —

**Добавление узлов на грани элементов**, то к середине каждой грани каждого выбранного элемента будет добавлен новый узел (рис. 6.3-15, *в*).

При выполнении операции используется традиционный порядок работы:

- активировать операцию и указать в выпадающем меню ее вид;
- выбрать на схеме элементы, к которым присоединяются узлы, и нажать кнопку **ОК** в разделе **Элементы** инструментальной панели **Узлы и Элементы**.

## Дробление стержней с учетом промежуточных узлов



Эта операция позволяет разделить стержень на несколько элементов с учетом узлов, лежащих вдоль исходного стержня. Точность определения «принадлежности» узла исходному стержню определяется параметром **Точность оценки совпадающих узлов** (раздел меню ***Настройка параметров среды***).

Правила наследования параметров исходного стержня элементами, полученными в результате дробления, следующие:

- жесткостные характеристики (если они были заданы) наследуются новыми элементами;
- шарниры будут примыкать к тем же узлам, что и в исходном стержне;
- жесткие вставки, заданные вдоль направления местной оси $X_1$, т. е. вдоль стержня, будут примыкать к тем же узлам, что и в исходном стержне;
- жесткие вставки, заданные по другим направлениям, будут удалены (об этом будет выдано соответствующее сообщение);
- нагрузки, заданные на исходном стержне, будут перенесены на новые элементы.

Для выполнения операции следует выбрать на схеме нужные элементы и нажать кнопку  инструментальной панели.

## Сдвиг элементов



Эта операция используется для переноса фрагмента расчетной схемы, состоящего из выбранных элементов, в заданном направлении. Расстояние, на которое выполняется перенос, и направление задаются в диалоговом окне **Сдвиг элементов** (рис. 6.3-16), которое появляется после активации операции.

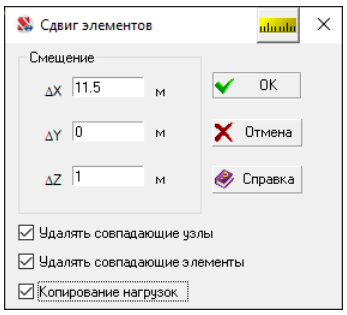



Рис. 6.3-16. *Диалоговое окно* **Сдвиг элементов**

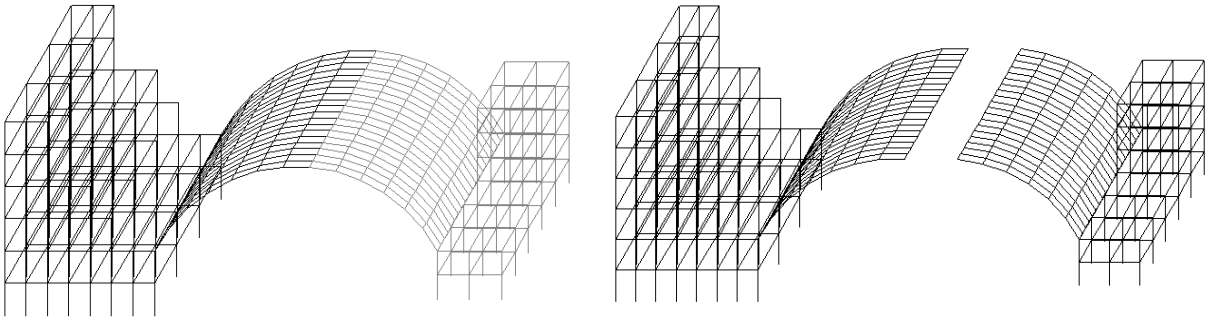
Для выполнения операции следует:

- активировать операцию и задать величину сдвига в появившемся диалоговом окне;
- выбрать на схеме элементы, входящие в сдвигаемый фрагмент;
- нажать кнопку **ОК** инструментальной панели.

При выполнении сдвига в диалоговом окне **Сдвиг элементов** можно с помощью маркеров потребовать или отказаться от объединения совпадающих узлов или элементов, а также от копирования нагрузок.

Если сдвигаются все элементы, примыкающие к узлу, то этот узел переместится вместе с элементами. Узлы, одновременно принадлежащие и перемещаемому фрагменту, и части схемы,

остающейся на месте, заменяются двумя узлами, один из которых остается на месте, а другой — перемещается вместе с фрагментом.



*а*) *б*)

Рис. 6.3-17. *Исходная схема* (*а*) *и схема-результат* (*б*) *после выполнения операции сдвига*

В том случае, если в результате перемещения новый узел окажется совпавшим с другим, существующим в схеме узлом, он будет удален, и в схеме останется существующий узел. Пример выполнения операции приведен на рисунке 6.3-17.

### Отсоединение всех дополнительных узлов от граней элементов



С помощью этой операции можно «отсоединить» все дополнительные узлы от выбранных высокоточных элементов. Для ее выполнения следует отметить на схеме элементы, на ребрах которых есть дополнительные узлы, и нажать кнопку **ОК** в инструментальной панели.



**Отсоединенные узлы после выполнения этой операции автоматически не удаляются.**

### Объединение элементов



Эта операция используется для объединения пар трехузловых элементов, имеющих общую грань, в четырехузловые, а также для объединения в один нескольких пластинчатых элементов. Выбор второго варианта выполнения операции осуществляется по «правой стрелке». Объединение выполняется по следующим правилам:

- если выбрано объединение трехузловых элементов в четырехузловые, то анализируется возможность объединения попарно всех селектированных треугольных КЭ, и для допустимых пар выполняется операция;
- если выполняется объединение пластинчатых элементов, то в результате могут быть получены только трех- или четырехузловые элементы без учета узлов, примыкающих к граням;
- если жесткости элементов, участвующих в операции, совпадают, то жесткость результирующего элемента будет соответствовать жесткости объединяемых элементов, в противном случае результирующий элемент не будет иметь жесткостных характеристик;
- нагрузки, заданные для исходных элементов, теряются;
- в процессе объединения осуществляется контроль геометрической формы результирующих элементов.

Порядок выполнения операции традиционный — активировать операцию (выбрать в меню вариант выполнения), отметить элементы и нажать кнопку **ОК**. Если для выбранной группы элементов операция не выполнится, то следует попробовать выполнить ее для части группы.

Учитывая, что большинство параметров, назначенных ранее трехузловым элементам, в результате объединения будет потеряно, рекомендуется использовать рассматриваемую операцию на ранних стадиях формирования модели.

## Дробление пластин по линии пересечения



Операция используется для разбиения пластинчатых элементов по линиям их пересечения и построения согласованных сеток КЭ. Элементы могут пересекаться под любым углом, но не должны лежать в одной плоскости.

При выполнении операции не контролируется качество полученных конечных элементов. Контроль рекомендуется выполнить, воспользовавшись операцией **Качество триангуляции**, описание которой приведено ниже в этом же разделе.

Элементы, полученные в результате дробления, наследуют характеристики жесткости, коэффициенты постели, ориентацию осей выдачи усилий и нагрузки, заданные для исходного элемента.

Для выполнения операции после ее активации следует выбрать участвующие в ней элементы и нажать кнопку **OK** в разделе **Элементы** инструментальной панели.

## Продолжить стержень до пластины



Эта операция позволяет «дотянуть» выбранный стержень до выбранной пластины. Если точка пересечения стержня с пластиной не совпадает с существующим узлом, то выполняется дробление пластины и построение сетки КЭ.

При выполнении операции не контролируется качество полученных конечных элементов. Контроль рекомендуется выполнить, воспользовавшись операцией **Качество триангуляции**, описание которой приведено ниже в этом же разделе.

Элементы, полученные в результате дробления, наследуют характеристики жесткости, коэффициенты постели, ориентацию осей выдачи усилий и нагрузки, заданные для исходного элемента.

Для выполнения операции после ее активации следует выбрать участвующие в ней элементы и нажать кнопку **OK** в разделе **Элементы** инструментальной панели.

## Сопряжение стержней



Операция используется для сопряжения двух стержней, лежащих в одной плоскости, путем «дотягивания» их до точки пересечения. В точке пересечения стержней вводится узел. Если в диалоговом окне **Сопряжение стержней** (рис. 6.3-18) задано отличное от нуля значение радиуса скругления, то стержни сопрягаются по дуге указанного радиуса, которая разбивается на n участков.

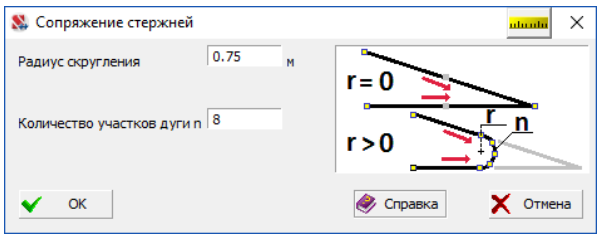



Рис. 6.3-18. *Диалоговое окно* **Сопряжение стержней**

Для выполнения операции после ее активации следует выбрать участвующие в ней элементы и нажать кнопку **OK** в разделе **Элементы** инструментальной панели.

## Построение стержней, перпендикулярных выбранному



Рассматриваемая операция позволяет ввести новые стержни, выходящие из выбранных узлов и направленные таким образом, чтобы они были перпендикулярны указанному стержневому элементу и дробили этот элемент в точках пересечения.

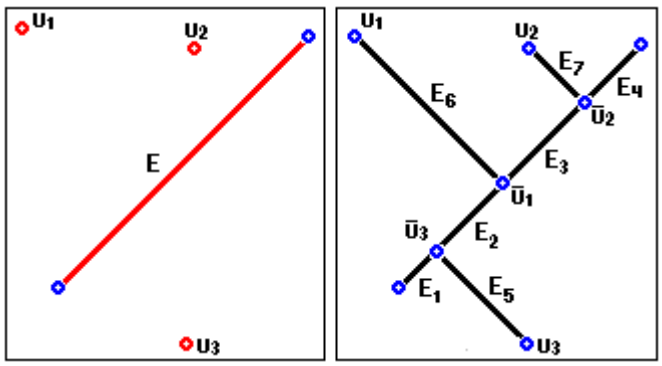



Рис. 6.3-19. *Ввод стержней, перпендикулярных выбранному стержню*

Пример выполнения операции показан на рис. 6.3-19, где
E — исходный стержневой элемент;
$u_1$, $u_2$, $u_3$ — выбранные узлы;
$\bar{u}_1$, $\bar{u}_2$, $\bar{u}_3$ — узлы, образованные в точках пересечения;
$E_1$ – $E_4$ — элементы, полученные в результате дробления исходного стержня;
$E_5$ – $E_7$ — элементы, выходящие из выбранных узлов.

При выполнении операции используется следующий порядок работы:
- активировать операцию и выбрать элемент, перпендикулярно которому будут вводиться новые стержни;
- выбрать на схеме узлы, из которых будут восстанавливаться перпендикуляры к выбранному элементу;
- нажать кнопку **OK** в разделе **Элементы** инструментальной панели **Узлы и Элементы**.

## Оценка качества триангуляции



Операция предназначена для оценки качества сетки конечных элементов и повторяет аналогичную операцию, рассмотренную ранее при описании генерации произвольных сеток конечных элементов на плоскости (см. раздел 5.12).

## Повышение качества триангуляции



Если качество триангуляции (оценить его можно, воспользовавшись приведенной ранее операцией  ) оказывается неудовлетворительным, то с помощью рассматриваемой операции можно попытаться улучшить показатели качества путем автоматического смещения узлов.

Операция выполняется в два шага. На первом шаге после активации операции и перед ее выполнением появляется сообщение о необходимости отметить на расчетной схеме элементы, форма которых должна быть изменена. Если отметку не производить и просто нажать кнопку **OK** -  в инструментальной панели, то в операции будут участвовать все элементы модели.

На втором шаге появляется аналогичное сообщение, которое предлагает отметить узлы, координаты которых не должны изменяться (например, если речь идет о повышении качества триангуляции элементов плиты перекрытия, то узлы, к которым примыкают колонны, вероятно,

нужно пометить как неподвижные). Если узлы не будут отмечены и будет нажата кнопка **OK** –  инструментальной панели, то будет считаться, что никаких ограничений нет, и любые узлы могут быть передвинуты.

### Экспорт полигона из выделенных пластин



Операция позволяет сохранить в формате файла исходных данных конструктора сечений **Консул** (расширение **.con**) полигон, состоящий из произвольного набора пластинчатых конечных элементов, лежащих в одной плоскости.

### Перенумерация элементов



Операция позволяет перенумеровать элементы расчетной схемы в соответствии с выбранными пользователем правилами. Предусмотрена возможность произвести нумерацию таким образом, чтобы предварительно отмеченные элементы получили минимальные номера, а удаленные элементы оказались в конце списка. Для всех прочих элементов или только отмеченных (если выбран маркер **Перенумеровывать только отмеченные элементы**) правила перенумерации устанавливаются в таблице (см. рис. 6.3-20).

Следует маркерами отметить те компоненты координат центра масс элемента, которые будут учитываться при сортировке, а с помощью кнопок **Вверх** и **Вниз** установить приоритеты. Например, если таблица имеет вид, показанный на рисунке 6.3-20, то все отмеченные элементы получат первые номера, удаленные элементы получат последние номера, для всех прочих элементов минимальные номера получат элементы в порядке возрастания типа конечного элемента. В том случае, когда элементы имеют одинаковый тип, перенумерация будет производиться в порядке возрастания координат Z, X, Y. Для параметров можно использовать маркер **Обратный порядок**, который позволяет производить перенумерацию не по возрастанию, а по убыванию значений.

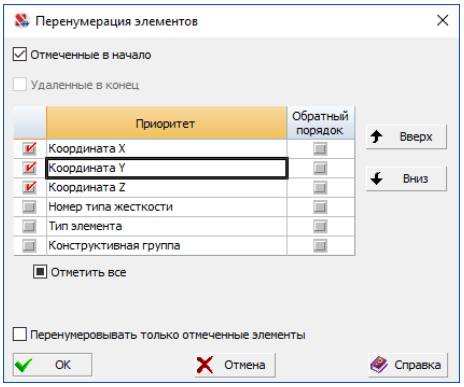



Рис. 6.3-20. *Диалоговое окно* **Перенумерация элементов**

### Копирование свойств элементов



Операция используется в тех случаях, когда нескольким элементам расчетной схемы необходимо назначить свойства, аналогичные свойствам элемента-эталона. Набор копируемых свойств зависит от вида элемента. Для стержней он включает:

- жесткостные характеристики;
- условия примыкания (шарниры и жесткие вставки);
- ориентация главных осей инерции;

- преднапряжение;
- коэффициенты упругого основания;
- принадлежность группам (включая группы конструктивных элементов) и заданное армирование;
- нагрузки.

Для плоскостных элементов копируются:

- жесткостные характеристики;
- коэффициенты упругого основания;
- преднапряжение;
- ориентация осей выдачи усилий;
- смещение срединной плоскости;
- принадлежность группам (включая группы конструктивных элементов) и заданное армирование;
- нагрузки.

После активации операции появляется диалоговое окно **Копирование свойств элемента** (рис. 6.3-21), которое содержит две группы элементов управления. Группа **Элемент-эталон** обеспечивает выбор и визуализацию элемента, чьи свойства копируются, а группа **Элементы-наследники** — выбор и визуализацию элементов, которые получают свойства элемента-эталона.

Копирование позволяет назначить «наследникам» определенные свойства эталона, выбор которых выполняется в диалоговом окне **Параметры копирования** (рис. 6.3-22). Окно вызывается нажатием одноименной кнопки после выбора «эталона» и «наследников».

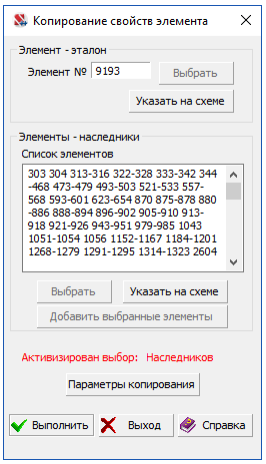



Рис. 6.3-21. *Диалоговое окно* **Копирование свойств элемента**

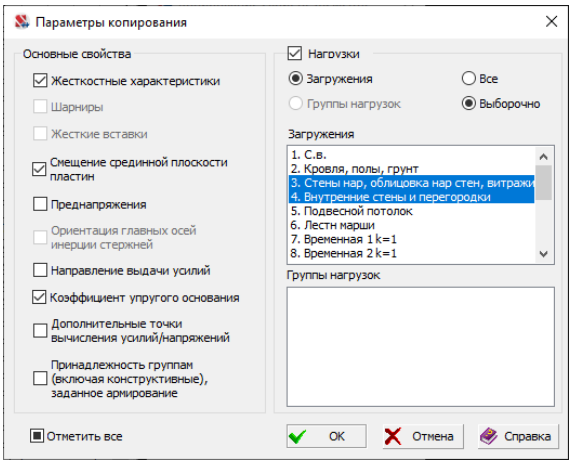



Рис. 6.3-22. *Диалоговое окно* **Параметры копирования**

В этом окне с помощью маркеров в группе **Основные свойства** назначается набор свойств. Кроме того, в группе **Нагрузки** можно назначить правила копирования нагрузок (загружения или группы, все или выборочно). При выборочном копировании нагрузок имена копируемых загружений или групп выбираются из одноименных списков. Рекомендуется следующий порядок действий при копировании:

- в диалоговом окне **Копирование свойств элемента** в поле *Элемент №* ввести номер элемента-эталона и нажать кнопку **Выбрать**. Выбранный элемент выделяется на схеме зеленым цветом. Если это действие удобнее выполнить указанием курсора, то нажать кнопку **Указание на схеме** и затем отметить курсором нужный элемент;
- нажатием кнопки **Параметры копирования** вызвать окно назначения свойств элементам-наследникам и установить в нем набор копируемых свойств;
- ввести номера элементов-наследников в поле *Список элементов* и нажать кнопку **Выбрать** для маркировки этих элементов на схеме. Если выбор удобнее выполнить указанием курсора, то перед этим действием следует нажать кнопку **Указание на схеме**;

– после выбора всех элементов-наследников нажать кнопку **Выполнить** в диалоговом окне **Копирование свойств элемента**.

## Дробление стержней полигоном



Эта операция предназначена для дробления стержней в точках их пересечения плоскостью, заданной полигоном. Операция используется в тех случаях, когда в точке пересечения отсутствует узел, лежащий на стержне. Например, она может быть полезна для дробления стержней плоскостью триангуляции перед триангуляцией.

Для выполнения операции рекомендуется следующий порядок действий:

- активировать операцию, после чего появится сообщения «Выберите узлы, являющиеся вершинами полигона»;
- по правилам, аналогичным вводу полигона при задании контура триангуляции, задать полигон;
- после завершения ввода полигона (двойной «клик» левой кнопкой мыши) появится сообщение «Выберите элементы»;
- выбрать на схеме стержневые элементы, которые необходимо раздробить;
- нажать кнопку **OK** в инструментальной панели.

## Создание пластинчатой модели стержня



Данная операция позволяет заменить тонкостенный стержень соответствующей моделью из пластинчатых элементов. Операция применима к стержням, имеющим поперечное сечение из металлопроката (включая холодногнутые профили), а также сварные сечения.

При активации этой операции появляется диалоговое окно (рис. 6.3-23), в котором следует задать информацию о требуемом разбиении поперечного сечения.

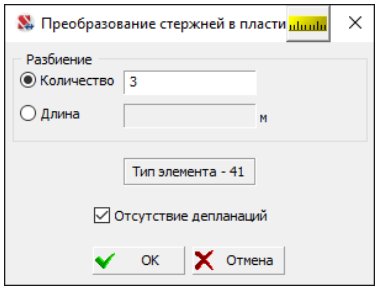



Рис. 6.3-23. *Диалоговое окно* **Преобразование стержней в пластины**

Предусмотрены две опции:

1. Задать количество разбиений;
2. Задать максимальную длину стороны пластинчатого конечного элемента.

В первом случае программа определяет длину самого короткого ребра поперечного сечения (стенки, полки, ...) и определяет на основании заданного числа разбиений максимально допустимый размер пластинчатого конечного элемента. Далее каждое ребро поперечного сечения делится на минимально возможное число частей одинаковой длины, не превышающей определенную выше длину.

Во втором случае каждое ребро делится на минимально возможное число частей одинаковой длины, не превышающей заданную длину.

На рис. 6.3-24 показан результат построения пластинчатой модели при различных параметрах разбиения.

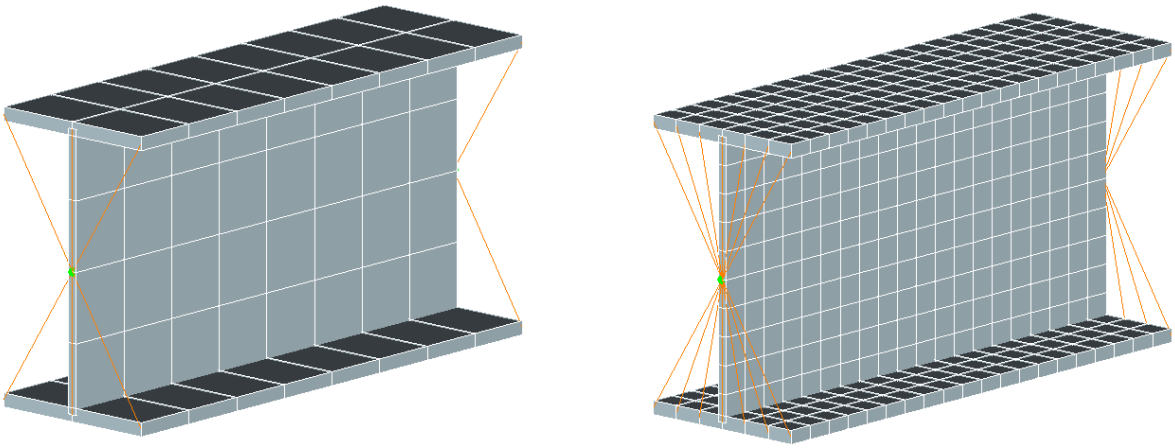


Рис. 6.3-24. Результат построения пластинчатой модели

Пластинчатая модель стержня строится с использованием четырехузловых конечных элементов, тип которых может быть изменен/выбран пользователем. Кроме того, в местах, которые соотвествуют концевым сечениям стержня, устанавливаются абсолютно жесткие тела, тип которых зависит от выбранной опции наличия или отсутствия депланаций. Наличие шарниров и жестких вставок моделируется с помощью абсолютно жестких тел и объединения перемещений.

Данная операция может быть полезна, например, при детальном анализе вопросов устойчивости плоской формы изгиба.

## 6.4. Ввод и назначение параметров специальных конечных элементов

Операции управления вводом и назначением характеристик специальным конечным элементам сосредоточены в инструментальной панели **Узлы и Элементы** препроцессора и открываются нажатием кнопки  **Специальные элементы**.




Рис. 6.4-1. *Группа кнопок* **Специальные элементы**

Группа кнопок управления вводом специальных элементов (рис. 6.4-1) используется для выполнения следующих операций:

 — ввод нуль-элементов;

 — ввод связей конечной жесткости;

 — ввод упругих связей;

 — ввод узловых демпферов;

 — ввод одноузловых законтурных элементов плиты на упругом основании;

 — ввод двухузловых законтурных элементов плиты на упругом основании;

 — ввод вантовых элементов;

 — ввод абсолютно твёрдых тел;

 — ввод и назначение параметров односторонних связей.

## Ввод нуль-элемента



Операция используется для назначения характеристик и ввода специальных конечных элементов типа 154 (так называемых «нуль-элементов»), которые обеспечивают запрещение линейных и угловых перемещений по направлениям осей местной системы координат элемента, а также расчет на заданные перемещения, не совпадающие с направлением осей общей системы координат.

При вводе новых элементов рекомендуется следующий порядок работы:

- активировать операцию и в появившемся диалоговом окне (рис. 6.4-2) указать, по каким направлениям местной системы координат элемента запрещаются или задаются перемещения (направление указывается числом, большим нуля, в соответствующем поле ввода);
- выйти из диалогового окна по кнопке **OK** и ввести элементы по правилам, аналогичным вводу одиночных стержней с помощью резиновой нити.

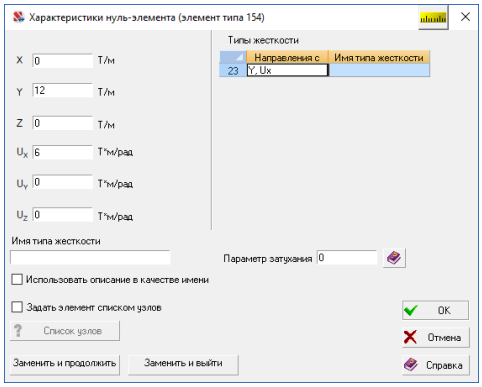



Рис. 6.4-2. *Диалоговое окно* **Характеристики нуль-элемента**

Следует учесть, что первый узел элементов этого типа должен обязательно примыкать к конструкции, а второй узел — быть свободным (он не может принадлежать какому-либо элементу или быть закреплен).

Маркер **Задать элемент списком узлов** позволяет создать конечный элемент не используя манипулятор мышь, а путем перечисления номеров узлов. Номера узлов можно ввести в диалоговом окне, которое активируется нажатием кнопки **Список узлов** (рис. 6.3-2).

При корректировке характеристик ранее введенных элементов рекомендуется:

- активировать операцию и в появившемся диалоговом окне отметить в таблице строку с изменяемыми характеристиками (поля ввода будут заполнены соответствующими значениями);
- заменить значения в нужных полях ввода или имя типа в одноименном поле;
- в зависимости от того, будут ли корректироваться характеристики других типов жесткости, нажать кнопку **Заменить и выйти** (корректировка других типов не выполняется) или **Заменить и продолжить** (предполагается корректировка других типов).

## Ввод связей конечной жесткости



С помощью этой операции выполняется ввод элементов, моделирующих одноузловые связи конечной жесткости (элемент типа 51), а также назначаются их жесткостные характеристики. Направление и жесткостные характеристики связей задаются в диалоговом окне **Связи конечной жесткости** (рис. 6.4-3), вид которого зависит от признака схемы расчетной модели.

При назначении новых связей рекомендуется следующий порядок работы:
- активировать операцию и в появившемся диалоговом окне задать значения жесткости связи по соответствующим направлениям (связь считается работающей по выбранному направлению, если значение жесткости по этому направлению больше нуля);
- выйти из диалогового окна по кнопке **OK** и выбрать на схеме узлы, к которым привязываются связи;
- нажать кнопку **OK** в инструментальной панели.

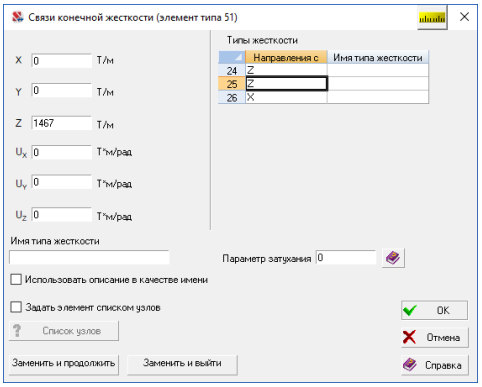



Рис. 6.4-3. *Диалоговое окно* **Связи конечной жесткости**

При корректировке характеристик уже назначенных упругих связей рекомендуется:
- активировать операцию и в появившемся диалоговом окне отметить в таблице строку с номером корректируемого типа жесткости;
- заменить значения жесткости в соответствующих полях ввода или имя типа жесткости в одноименном поле;
- в зависимости от того, будут ли корректироваться характеристики других типов жесткости, нажать кнопку **Заменить и выйти** (корректировка других типов не выполняется) или **Заменить и продолжить** (предполагается корректировка других типов).

Маркер **Задать элемент списком узлов** позволяет создать конечный элемент не используя манипулятор мышь, а путем указания номера узла. Номер узла можно ввести в диалоговом окне, которое активируется нажатием кнопки **Список узлов** (рис. 6.3-2).

## Ввод упругих связей



Эта операция позволяет выполнить ввод и назначить жесткостные характеристики элементам, моделирующим упругую связь между двумя узлами (тип 55).

Направление и жесткостные характеристики связей задаются в диалоговом окне **Упругие связи** (рис. 6.4-4), вид которого зависит от признака схемы расчетной модели. При назначении новых связей рекомендуется следующий порядок работы:
- активировать операцию и в появившемся диалоговом окне задать значения жесткости связи по соответствующим направлениям (связь считается работающей по выбранному направлению, если значение жесткости по этому направлению больше нуля);
- выйти из диалогового окна по кнопке **OK** и ввести элементы.

Ввод элементов выполняется по тем же правилам, что и одиночных стержней — установить курсор с мишенью  в узел и нажать левую кнопку мыши, протянуть резиновую нить до второго узла и опять нажать кнопку мыши. Повторить указанные действия для ввода очередного элемента. Узел, который был выбран первым, будет назначен первым узлом связи, т. е. точкой начала местной системы координат.

Следует учесть, что этот тип элемента может иметь нулевую длину, т. е. примыкать к узлам с совпадающими координатами.

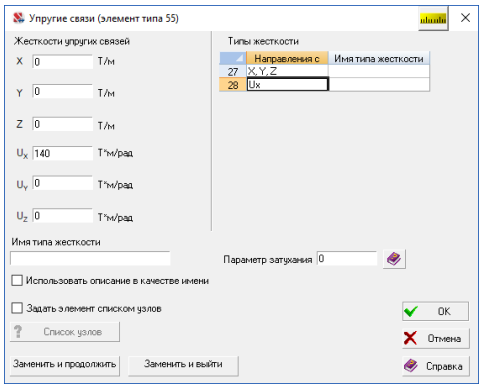



Рис. 6.4-4. *Диалоговое окно* **Упругие связи**

Характеристики упругой связи могут быть заданы как в местной, так и в общей системе координат. Для связей нулевой длины они будут только в общей системе координат. Если узлы разнесены, то можно определить местную систему координат элемента аналогично стержневым элементам с помощью операции **Ориентация осей инерции**, подробно описанной в разделе 7.3.

При корректировке характеристик уже назначенных связей рекомендуется:

- активировать операцию и в появившемся диалоговом окне отметить в таблице строку с номером корректируемого типа жесткости;
- заменить значения жесткости в соответствующих полях ввода или имя типа жесткости в одноименном поле;
- в зависимости от того, будут ли корректироваться характеристики других типов жесткости, нажать кнопку **Заменить и выйти** (корректировка других типов не выполняется) или **Заменить и продолжить** (предполагается корректировка других типов).

Маркер **Задать элемент списком узлов** позволяет создать конечный элемент не используя манипулятор мышь, а путем перечисления номеров узлов. Номера узлов можно ввести в диалоговом окне, которое активируется нажатием кнопки **Список узлов** (рис. 6.3-2).

## Ввод двухузловых законтурных элементов плиты



Операция используется для задания характеристик и ввода двухузловых конечных элементов, моделирующих отпор грунта за пределами плиты. Характеристики элементов задаются в диалоговом окне **Двухузловой законтурный элемент плиты** (рис. 6.4-5).

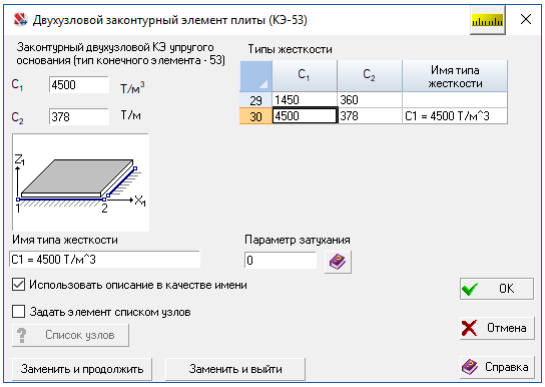



Рис. 6.4-5. *Диалоговое окно* **Двухузловой законтурный элемент плиты**

При вводе новых элементов рекомендуется следующий порядок работы:

- активировать операцию и в появившемся диалоговом окне задать характеристики упругого основания, которые описываются парой коэффициентов $C_1$ и $C_2$;
- выйти из диалогового окна по кнопке **OK** и ввести элементы.

Элементы вводятся по тем же правилам, что и стержни с учетом пересекаемых ими узлов.

При корректировке характеристик ранее введенных элементов рекомендуется:
- активировать операцию и в появившемся диалоговом окне отметить в таблице строку с изменяемыми характеристиками (поля ввода $C_1$ и $C_2$ будут заполнены соответствующими значениями);
- заменить значения в нужных полях ввода или имя типа жесткости в одноименном поле;
- в зависимости от того, будут ли корректироваться характеристики других типов, нажать кнопку **Заменить и выйти** (корректировка других типов не выполняется) или **Заменить и продолжить** (предполагается корректировка других типов).

Маркер **Задать элемент списком узлов** позволяет создать конечный элемент не используя манипулятор мышь, а путем перечисления номеров узлов. Номера узлов можно ввести в диалоговом окне, которое активируется нажатием кнопки **Список узлов** (рис. 6.3-2).

## Ввод одноузловых законтурных элементов плиты



Операция используется для задания характеристик и ввода одноузловых конечных элементов, моделирующих отпор грунта угловой зоны фундаментной плиты (тип 54). Характеристики элементов задаются в диалоговом окне **Одноузловой законтурный элемент плиты** (рис. 6.4-6) и включают коэффициент постели $C_2$ и угол зоны грунта $\varphi$.

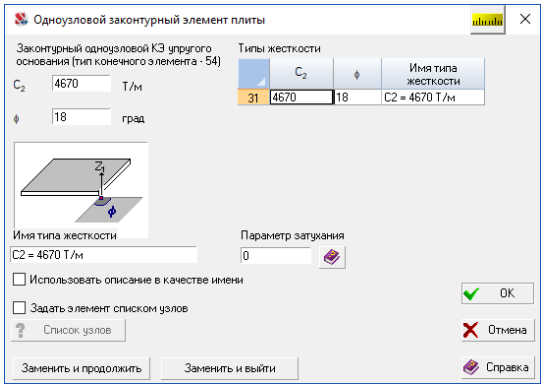



Рис. 6.4-6. *Диалоговое окно* **Одноузловой законтурный элемент плиты**

Правила работы при задании и корректировке характеристик элемента совпадают с описанными выше правилами для двухузлового элемента. Ввод элементов выполняется аналогично одноузловым элементам, моделирующим связь конечной жесткости (тип 51).

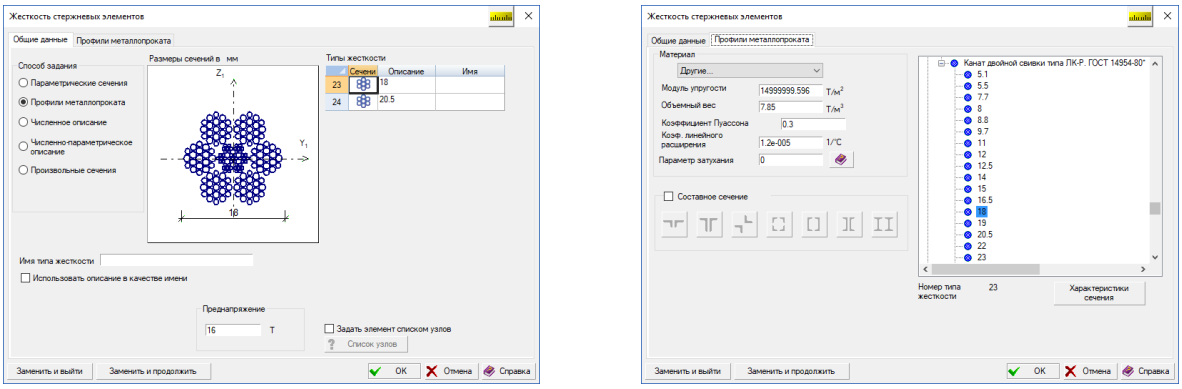
Маркер **Задать элемент списком узлов** позволяет создать конечный элемент не используя манипулятор мышь, а путем указания номера узла. Номер узла можно ввести в диалоговом окне, которое активируется нажатием кнопки **Список узлов** (рис. 6.3-2).

## Ввод вантовых элементов



Задание характеристик и ввод вантовых элементов (тип 308) выполняется аналогично двухузловым элементам, моделирующим упругие связи — перед вводом элементов задаются их жесткостные характеристики, а сам ввод выполняется по тем же правилам, что и ввод стержней. Информация о реализации элементов этого типа и особенностях расчета систем, включающих вантовые элементы, приведена в разделе 28.

При вводе новых элементов рекомендуется следующий порядок работы:
- активировать операцию и в появившемся диалоговом окне **Жесткость стержневых элементов** задать жесткостные характеристики элементов вант и значение преднапряжения;
- выйти из диалогового окна по кнопке **OK** и ввести элементы.




*а*) *б*)

Рис. 6.4-7. *Диалоговое окно* **Жесткость стержневых элементов**
*а*) *Страница* **Общие данные** *б*) *Страница* **Профили металлопроката**

Жесткостные характеристики вант могут быть заданы в виде параметрических сечений, описаны численно или взяты из сортамента металлопроката. В сортаменте металлопроката только для вантовых элементов доступен «Сортамент стальных оцинкованных канатов». Задание характеристик выполняется по тем же правилам, что и для стержневых элементов (см. раздел *Задание характеристик узлов и элементов)*. Для вант (в отличие от стержней) обязательным является задание значений преднапряжения.

После выхода из окна выполняется ввод элементов путем протягивания резиновой нити между узлами, к которым примыкают ванты.

Маркер **Задать элемент списком узлов** позволяет создать конечный элемент не используя манипулятор мышь, а путем перечисления номеров узлов. Номера узлов можно ввести в диалоговом окне, которое активируется нажатием кнопки **Список узлов** (рис. 6.3-2).

## Ввод односторонних связей



Эта операция используется для задания характеристик и ввода элементов односторонних связей (описание элементов приведено в разделе 28), которые позволяют моделировать контакты между фрагментами схемы, а также схемы с другой конструкцией или основанием. Элементы могут быть как одно, так и двухузловыми и их использование в расчетной модели предусматривает выполнение нелинейного расчета.

При вводе новых элементов рекомендуется следующий порядок работы:

- активировать операцию и в появившемся диалоговом окне **Односторонние связи** (рис. 6.4-8) задать вид и характеристики связи;
- выйти из диалогового окна по кнопке **OK** и ввести элементы.

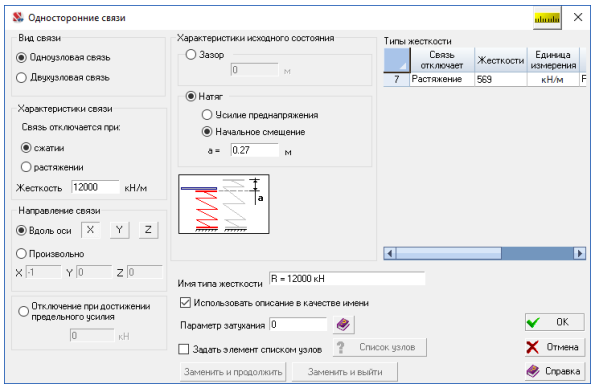



Рис. 6.4-8. *Диалоговое окно* **Односторонние связи**

Ввод одноузловых элементов выполняется по тем же правилам, что и одноузловые элементы, моделирующие связь конечной жесткости (тип 51), а двухузловых — аналогично стержням.

Характеристики связи определяют ее продольную жесткость **EF**, а также условия работы (сжатие или растяжение). Направление связи для одноузловых и двухузловых элементов нулевой длины задается в общей системе координат. Двухузловые элементы ненулевой длины задают связь в местной системе координат элемента. Наличие ограничений перемещений в одном узле по двум и более направлениям моделируется введением нескольких элементов.

Исходное состояние связи определяется зазором или введением натяга, который задается как усилие преднапряжения.

Для корректировки характеристик односторонних связей следует выполнить следующие действия:

- загрузить диалоговое окно **Односторонние связи**;
- в таблице **Тип жесткости** отметить строку с параметрами корректируемого элемента (характеристики выбранного типа жесткости попадут в поля ввода окна);
- изменить параметры;
- нажать кнопку **Заменить и выйти**, если не предполагается изменение параметров других связей, или **Заменить и продолжить**, если будут корректироваться и другие типы жесткости.

Маркер **Задать элемент списком узлов** позволяет создать конечный элемент не используя манипулятор мышь, а путем перечисления номеров узлов. Номера узлов можно ввести в диалоговом окне, которое активируется нажатием кнопки **Список узлов** (рис. 6.3-2).

## Ввод внешних узловых демпферов



С помощью этой операции выполняется ввод элементов для описания внешних демпфирующих устройств, реагирующих на скорость перемещения узла по направлениям степеней свободы в общей системе координат (элемент типа 56), а также назначаются коэффициенты вязкого демпфирования. Направление и коэффициенты задаются в диалоговом окне **Узловой демпфер** (рис. 6.4-9), вид которого зависит от признака схемы расчетной модели.

При назначении демпферов рекомендуется следующий порядок работы:

- активировать операцию, и в появившемся диалоговом окне задать значения коэффициентов демпфирования по соответствующим направлениям (демпфер считается работающим по выбранному направлению, если значение коэффициента по этому направлению больше нуля);
- выйти из диалогового окна по кнопке **ОК** и выбрать на схеме узлы, к которым привязываются демпфера;
- нажать кнопку **ОК** в инструментальной панели.

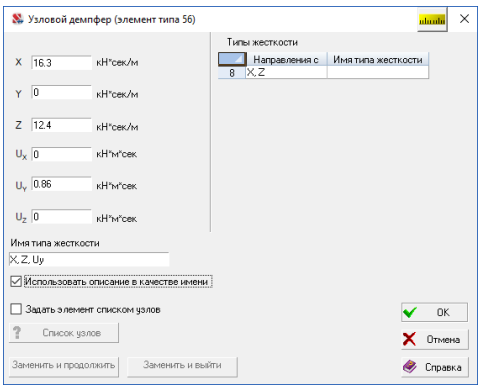



Рис. 6.4-9. *Диалоговое окно* **Узловой демпфер**

При корректировке характеристик уже назначенных узловых демпферов рекомендуется:

- активировать операцию и в появившемся диалоговом окне отметить в таблице строку с номером корректируемого типа;
- заменить значения коэффициентов в соответствующих полях ввода или имя типа в одноименном поле;
- в зависимости от того, будут ли корректироваться характеристики других типов жесткости, нажать кнопку **Заменить и выйти** (корректировка других типов не выполняется) или **Заменить и продолжить** (предполагается корректировка других типов).

Маркер **Задать элемент списком узлов** позволяет создать конечный элемент, не используя манипулятор мышь, а путем указания номера узла. Номер узла можно ввести в диалоговом окне, которое активируется нажатием кнопки **Список узлов** (рис. 6.3-2).

## 6.5. Ввод и назначение параметров абсолютно твердых тел



Операции по вводу и корректировке твердых тел вызываются из раздела **Специальные элементы**  инструментальной панели **Узлы и Элементы**. После нажатия кнопки **Твердые тела**  появляется меню, включающее набор операций с абсолютно твердыми телами (рис. 6.5-1). К ним относятся:

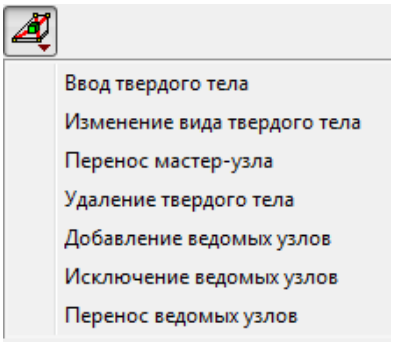



Рис. 6.5-1. *Меню управления вводом и корректировкой твердых тел*

- Ввод твердого тела;
- Изменение вида твердого тела;
- Перенос мастер-узла;
- Удаление твердого тела;
- Добавление ведомых узлов;
- Исключение ведомых узлов;
- Перенос ведомых узлов.

Если в расчетной схеме еще нет ни одного твердого тела, то сразу произойдет активация операции **Ввод твердого тела**.

Твердое тело представляет собой набор узлов. В этом наборе имеется выделенный узел (мастер-узел).

С точки зрения результатов расчета не имеет никакого значения, какой узел является мастер-узлом. Мастер-узел используется при отрисовке твердого тела (из этого узла рисуются отрезки, соединяющие его со всеми другими узлами конечного элемента). Для выбора твердого тела достаточно указать один из принадлежащих ему узлов или отрезок, соединяющий мастер-узел и один из ведомых узлов.

### Ввод твердого тела

После выбора этого пункта меню появляется диалоговое окно **Характеристики твердого тела** (рис. 6.5-2). В этом окне следует выполнить следующие действия:

- в группе **Характеристики твердого тела** с помощью маркеров выбрать вид твердого тела (двумерное, не допускающее деформации в своей плоскости, двумерное, не допускающее изгиб, трехмерное);
- уточнить коды связывания (направления степеней свободы) узлов жесткого тела (по умолчанию маркеры направлений активируются в зависимости от выбранного вида твердого тела);
- если это необходимо, ввести имя твердого тела.

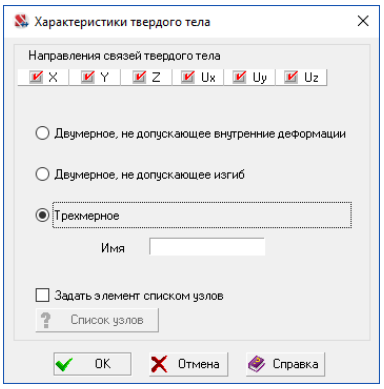



Рис. 6.5-2. *Диалоговое окно* **Характеристики твердого тела**

После нажатия кнопки **ОК** диалогового окна следует с помощью мыши отметить узлы, принадлежащие твердому телу и нажать кнопку  инструментальной панели.

После выполнения последнего действия твердое тело будет обозначено на схеме в виде «паука» (рис. 6.5-3), у которого мастер-узел соединен с остальными узлами тела линиями. При этом мастер-узел будет автоматически назначен узлу этого нового конечного элемента, который расположен наиболее близко к геометрическому центру набора узлов.

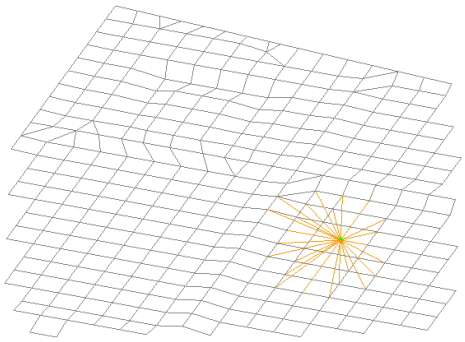


Рис. 6.5-3. *Изображение твердого тела*

Необходимо пояснить разницу между двумя типами двумерного твердого тела:

- тело, не допускающее деформации в своей плоскости (диск), может деформироваться в виде изгиба плоскости первоначального расположения его узлов, как это происходит в плоской диафрагме, устанавливаемой для предотвращения искажений поперечного сечения тонкостенного стержня;
- тело, не допускающее изгиб (штамп), остается плоским, хотя эта плоскость может смещаться и поворачиваться, а узлы такого тела перемещаться внутри такой плоскости.

Маркер **Задать элемент списком узлов** позволяет создать конечный элемент не используя манипулятор мышь, а путем перечисления номеров узлов. Номера узлов можно ввести в диалоговом окне, которое активируется нажатием кнопки **Список узлов** (рис. 6.3-2).

## Изменение вида твердого тела

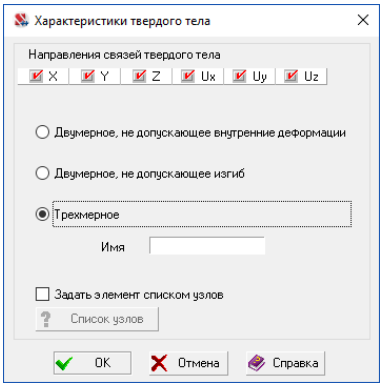



Рис. 6.5-4. *Диалоговое окно* **Характеристики твердого тела (**корректировка)

Эта операция позволяет изменить вид введенного ранее твердого тела. Для выполнения операции следует выполнить следующие действия:

- выбрать в меню управления вводом твердого тела указанную выше операцию;
- в появившемся диалоговом окне **Характеристики твердого тела** (рис. 6.5-4) с помощью маркеров назначить вид твердого тела и коды связывания (направления степеней свободы) узлов жесткого тела;
- выйти из окна нажатием кнопки **ОК**;
- выбрать элемент твердого тела;
- нажать кнопку **ОК** в инструментальной панели.

### Перенос мастер-узла

Мастер-узел можно перенести в любой из узлов твердого тела. Для этого следует выбрать операцию в меню, отметить существующий элемент твердого тела и узел, в который он переносится, нажать кнопку **ОК** в инструментальной панели.

### Удаление твердого тела

Для удаления твердого тела необходимо выбрать в меню одноименную операцию, выбрать удаляемый элемент и нажать кнопку **ОК** в инструментальной панели.

### Добавление ведомых узлов

Для добавления ведомых узлов необходимо выбрать в меню одноименную операцию, выбрать элемент твердого тела, к которому добавляются узлы, отметить узлы расчетной схемы, которые войдут в твердое тело, и нажать кнопку **ОК** в инструментальной панели.

### Исключение ведомых узлов

Для исключения ведомых узлов необходимо выбрать в меню одноименную операцию, выбрать элемент твердого тела, из которого исключаются узлы, отметить исключаемые узлы и нажать кнопку **ОК** инструментальной панели. Удаление ведомого узла только исключает узел из твердого тела, но не удаляет его из схемы.

### Перенос ведомых узлов

Для переноса ведомых узлов необходимо выбрать в меню одноименную операцию, указать курсором узел, который переносится (маркируется красным цветом) и узел, в который он переносится (маркируется синим цветом) и нажать кнопку **ОК** в инструментальной панели.

## 6.6. Группы узлов и элементов

**Группы** — это именованные наборы узлов или элементов, которые могут неоднократно использоваться для выполнения различных операций (назначения жесткостных характеристик, связей и нагрузок) при подборе арматуры и печати результатов в **Документаторе**. Наравне со схемами группы могут участвовать в режиме сборки, для групп узлов могут быть вычислены нагрузки от фрагмента схемы, определены крен здания и фундаментной плиты и т. п. Принцип объединения объектов в группы и задание имен групп полностью определяются пользователем.

Это могут быть характерные участки конструкции, например, плиты перекрытий на различных отметках, колонны этажа или другие наборы объектов. Главное, что группы доступны во всех режимах работы со схемой, как на этапе ее создания или назначения параметров для обработки данных в постпроцессорах (например, расчета РСУ), так и в процессе анализа и документирования результатов расчета. Графическая среда комплекса построена таким образом, что всегда можно локализовать информацию в рамках необходимой для работы группы узлов или элементов.

Автоматическое объединение элементов в группы выполняется при импорте данных из препроцессора **ФОРУМ** и в процессе преобразования данных, представленных в форматах **.dxf** и **.dwg** (каждый слой данных выделяется в отдельную группу).

Описываемые в данном разделе группы можно (условно) назвать *общими группами*. Существуют еще группы конструктивных железобетонных и стальных элементов, которые описаны в главах 19 и 20 соответственно.

Для работы с общими группами (не конструктивными) следует перейти на закладку **Группы** (рис. 6.6-1) и с помощью операции **Работа с группами узлов и элементов**  активировать инструментальную панель (рис. 6.6-2).

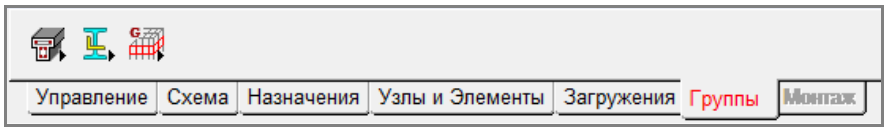



Рис. 6.6-1. За*кладка* **Группы**

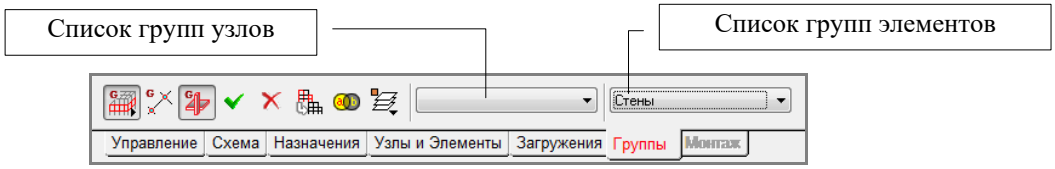



Рис. 6.6-2. *Раздел инструментальной панели* **Группы**

Вызов операций создания групп выполняется из инструментальной панели. Раздел содержит кнопки назначения объектов группы (узлы —  или элементы —  ), сохранения групп —  , сброса всех отметок —  , отказа от операции  , булевых операций с группами  , управления группами  и два списка для выбора ранее созданных групп узлов и элементов. После загрузки из списка все объекты активной группы маркируются на схеме как выбранные.

## Создание групп

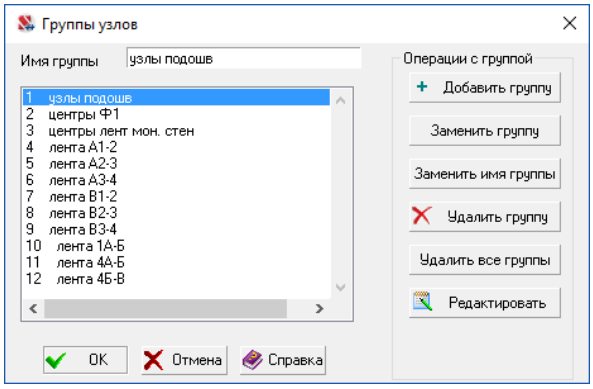



Рис. 6.6-3. *Диалоговое окно* **Группы узлов**

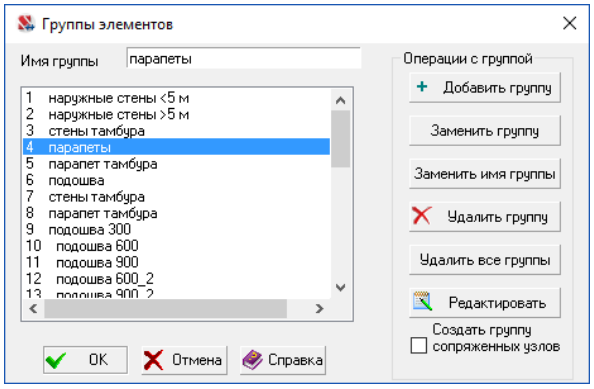



Рис. 6.6-4. *Диалоговое окно* **Группы элементов**

Для создания новой группы узлов или элементов необходимо:

- нажать кнопку, определяющую вид объектов группы (узлы или элементы);
- выбрать на расчетной схеме объекты группы;
- нажать кнопку сохранения/модификации группы  ;
- ввести в диалоговом окне **Группы узлов** (рис. 6.6-3) или **Группы элементов** (рис. 6.6-4) имя группы и нажать кнопку **Добавить группу**;
- нажать кнопку **ОК** в диалоговом окне.

После сохранения группы ее имя заносится в соответствующий список групп в инструментальной панели. Перед подготовкой следующей группы следует нажатием кнопки  отменить выбор объектов предыдущей группы.

При создании группы элементов можно автоматически сформировать группу **сопряженных** с элементами узлов, которая получит то же имя. Под «сопряженными» подразумеваются такие узлы, которые принадлежат элементам выбранной группы и одновременно хотя бы одному элементу, не входящему в эту группу. Для этого перед нажатием кнопки **Добавить группу** следует нажать кнопку **Создать группу сопряженных узлов**.

## Корректировка группы

Для изменения информации в группе необходимо выполнить следующие действия:

- выбрать из списка в инструментальной панели корректируемую группу;
- внести в нее изменения путем включения и/или исключения объектов;
- нажать кнопку сохранения группы;

– выбрать из списка номер или имя заменяемой группы;
– нажать кнопку **Заменить группу**;
– выйти из диалогового окна, нажав кнопку **ОК**.

Аналогично замене выполняется и удаление группы (напомним, что в данном контексте удаление группы означает только исключение ее из списка групп, а не удаление элементов группы из расчетной схемы). В этом случае после выбора группы в списке групп следует вызвать операцию **Сохранение/модификация группы**, установить в диалоговом окне номер группы и нажать кнопку **Удалить группу**. Кнопка **Редактировать** позволяет внести изменения в список узлов/элементов в текстовом формате.

### Выбор группы

Для выбора группы достаточно указать ее имя в соответствующем списке инструментальной панели. При этом все объекты активной группы отмечаются на схеме красным цветом.

Таким образом, сразу после вызова группы для этих объектов можно назначать и выполнять операции. Есть одно ограничение — из списков в инструментальной панели нельзя одновременно выбрать несколько групп, т. е. исключается случай, когда на схеме одновременно маркированы и группы узлов, и группы элементов, а также объекты, принадлежащие к разным группам. Если необходимо получить комбинацию из нескольких групп, то следует использовать цветовую шкалу индикации групп (кнопка **Группы** на панели фильтров).

### Операции с группами



Эта операция позволяет сформировать новую группу узлов или элементов, как результат выполнения одной из логических операций объединения, пересечения или разности с указанными группами. Порядок действий при выполнении операции следующий:

– активировать соответствующую кнопку вызова операции отметки:  — для работы с группами узлов или  — для работы с группами элементов;
– вызвать рассматриваемую операцию;
– в диалоговом окне **Операции с группами** (рис. 6.6-5) отметить в левом и правом списках по одной группе, участвующие в операции;
– нажать кнопку с наименованием выполняемой операции;
– в диалоговом окне **Имя группы** (рис. 6.6-6) задать имя результирующей группы и нажать кнопку **ОК**.

В результате будет сформирована новая группа, которая будет записана в конец списка групп. Указанные действия можно выполнить и с другими группами, в том числе и с полученными в результате выполнения логических операций. По окончанию работы выйти из диалогового окна нажатием кнопки **ОК**.

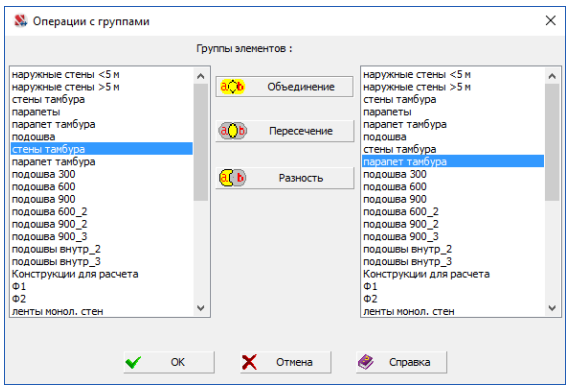



Рис. 6.6-5. *Диалоговое окно* **Операции с группами**

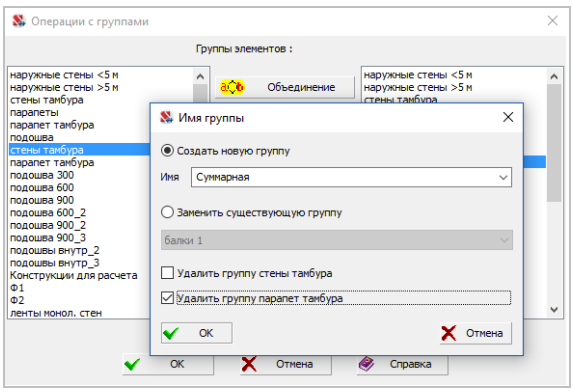



Рис. 6.6-6. *Диалоговое окно* **Имя группы**

## Управление группами



Операция используется для управления атрибутами групп и позволяет выполнить следующие действия: переименование групп, сортировка групп по заданному признаку, удаление групп и изменение места выбранной группы в списке групп. Если в схеме есть и группы узлов и группы элементов, выбор вида групп, с которыми будут выполняться действия, осуществляется в выпадающем меню, которое появляется после вызова операции. В противном случае (есть один вид групп) меню не появится и операция будет выполнена с имеющимися группами.

Операции выполняются в диалоговом окне **Управление группами элементов/узлов** (рис. 6.6-7), в котором находится таблица со списком групп. Графы таблицы групп включают:

- текущий номер группы;
- **№** — номер группы в порядке создания;
- **Имя** — имя конструктивной группы;
- **Количество элементов/узлов** в группе.

Для переименования группы следует установить курсор на имя нужной группы и дважды нажать левую кнопку мыши. Строка таблицы становится доступной для редактирования.

Сортировка групп в таблице выполняется по признаку, который выбирается в выпадающем списке **Сортировать по…**. Предусмотрены следующие виды сортировок:

- по номеру (в очередности создания группы — при нажатой кнопке **Min/Max**; и наоборот — при нажатой кнопке **Max/Min**);
- по имени группы (в алфавитном порядке при нажатой кнопке **Min/Max** и наоборот — при нажатой кнопке **Max/Min**);
- по количеству элементов/узлов в группе (по возрастанию количества в списке групп при нажатой кнопке **Min/Max** и наоборот — при нажатой кнопке **Max/Min**).

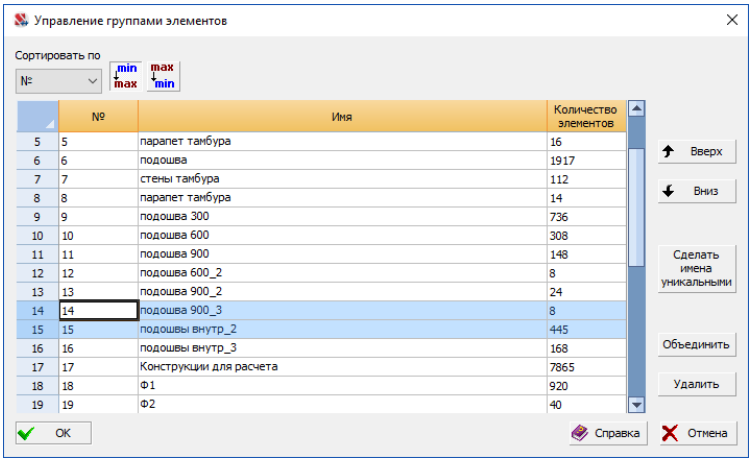



Рис. 6.6-7. *Диалоговое окно* **Управление группами элементов**

Удаление выбранных групп выполняется нажатием одноименной кнопки.

Для изменения положения в списке одной или нескольких групп необходимо отметить эти группы и переместить их по списку на нужное количество позиций нажатием на кнопки **Вверх** или **Вниз**.

Если в расчетной схеме есть группы с одинаковыми именами (например, такие группы могут появиться как результат работы препроцессора **ФОРУМ**), то использование кнопки **Сделать имена уникальными** позволяет автоматически переименовать их путем добавления к имени суффикса № XXX.

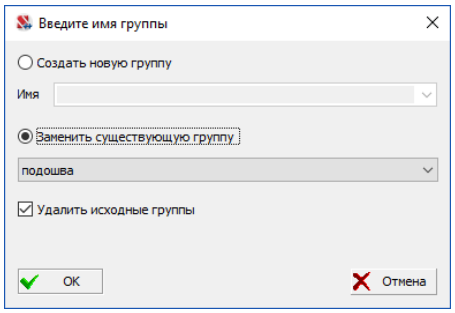



Рис. 6.6-8. *Объединение групп*

Если выбрано несколько групп, то становится активной кнопка **Объединить**, которая позволяет создать группу, включающую все элементы/узлы, входящие в отмеченные группы. При этом в диалоговом окне (рис. 6.6-8) следует ввести имя новой группы или указать, что нужно заменить существующую группу (ее следует выбрать в выпадающем списке). Кроме того, маркер **Удалить исходные группы** позволяет удалить все группы, которые участвуют в операции объединения.

Все назначения, сделанные в диалоговом окне, будут зафиксированы и выполнены после выхода из окна по кнопке **OK**. При этом, положение групп в списке инструментальной панели будут соответствовать их положению в списке диалогового окна.

# 7. Задание характеристик узлов и элементов

В этой главе рассматриваются операции, выполняемые при формировании расчетной схемы и связанные с заданием (назначением) характеристик узлам и элементам. Они собраны в разделе **Назначения** инструментальной панели (рис. 7-1), и при их использовании сохраняется уже знакомый порядок действий:

- выбрать операцию;
- ввести данные;
- выбрать объекты;
- выполнить назначение (нажать кнопку **ОК** в инструментальной панели или клавишу **Enter** на клавиатуре).

При назначении конкретных характеристик узлам и элементам предусмотрена возможность выборочного выполнения операции в зависимости от того, были ли выбранным объектам назначены эти характеристики ранее или нет. Набор правил назначения характеристик приводится в списке, стоящем в инструментальной панели справа от кнопок вызова операций. В списке предлагаются следующие правила выполнения операций:

**Всем выбранным** — характеристики будут назначены всем выбранным объектам, независимо от того, были ли они заданы ранее или нет;

**Без замены ранее заданных** — назначение будет выполнено только тем выбранным объектам, у которых отсутствуют задаваемые характеристики;

**Только с заменой ранее заданных** — операция будет выполнена только для тех объектов, которым уже назначались задаваемые характеристики (операция замены).

При задании связей в узлах правила назначения определяются в соответствующем диалоговом окне.

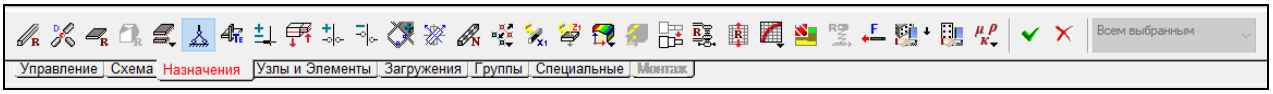



Рис. 7-1. *Раздел инструментальной панели* **Назначения**

Из инструментальной панели **Назначения** вызываются следующие операции:

 — назначение жесткостных характеристик соответственно стержневым, пластинчатым, многослойным, объемным, осесимметричным и специальным конечным элементам;

 — условия примыкания стержней

 — назначение коэффициентов упругого основания;

 — назначение связей в узлах;

 — назначение типов элементов;

 — ввод и удаление абсолютно жестких вставок;

 — смещение срединной плоскости пластин;

 — ввод и удаление шарниров в стержнях;

 — ввод и удаление шарниров в пластинах;

 — назначение ориентации местных осей стержневых элементов;

 — назначение промежуточных сечений для расчета усилий;


— объединение перемещений в узлах;


— изменение направления местной оси $X_1$ стержня;


— изменение направления местной оси $Z_1$ пластин;


— назначение направления осей выдачи усилий для пластинчатых и объемных элементов;


— linear resizing of cross sections;


— удаление дублирующихся типов жесткости;


— перенумерация жесткостей;


— выбор элементов для учета нелинейности;


— вызов программы **Кросс** для расчета коэффициентов постели;


— задание преднапряжения в элементах;


— задание схемы армирования пластинчатых элементов (см. главу 19);


— задание схемы армирования стержневых элементов (см. главу 19);


— назначение дополнительных данных для элементов.

## 7.1. Назначение жесткостных характеристик

Набор параметров, описывающих жесткостные характеристики элементов, зависит от вида элементов. В связи с этим в программе предусмотрены операции для назначения таких характеристик стержневым, пластинчатым, объемным и другим видам конечных элементов.

### Назначение жесткостных характеристик стержневым элементам



Физико-механические характеристики стержневых элементов могут быть заданы в виде численного описания, а также вычислены программно с учетом вида и размеров типовых параметрических сечений или выбранного профиля из сортамента металлопроката. Кроме того, эти характеристики могут быть получены как результат работы программ **Конструктор Сечений**, **Консул** или **ТОНУС**.

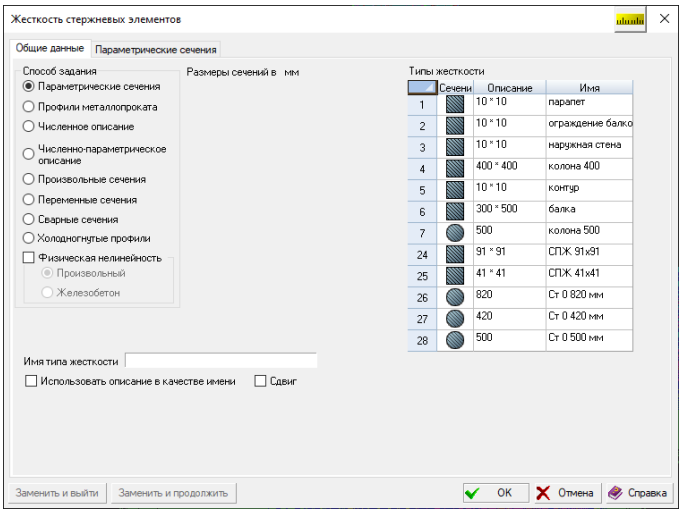



Рис. 7.1-1. *Диалоговое окно* **Жесткость стержневых элементов**

Данные вводятся в многостраничном диалоговом окне **Жесткость стержневых элементов** (рис. 7.1-1). Набор страниц этого окна зависит от способа описания жесткости. Переход между страницами выполняется указанием на соответствующую закладку. Способ задания жесткостных характеристик выбирается на странице **Общие данные** путем активации соответствующего маркера, после чего появляются закладки страниц, соответствующие выбранному способу. Кроме того, на первой странице находится таблица **Тип жесткости**, в которой для всех ранее заданных сечений приведены номер типа жесткости, условное изображение сечения, описание сечения (для всех сечений, кроме численного описания — это габариты сечения), имя типа жесткости (если оно было задано).

Условное обозначение **EF** — используется в таблице для выделения жесткостей, характеристики которых заданы в виде численного описания, а пиктограмма  — для характеристик, полученных из программ **Конструктор сечений**, **Консул** или **ТОНУС**. Комбинацией условного обозначения **EF** и пиктограммы одного из параметрических сечений отмечаются характеристики, заданные с помощью численно-параметрического описания.

Имя типа жесткости может быть введено в одноименном поле. Если активен маркер **Использовать описание в качестве имени**, то в это поле будет занесено содержимое графы **Описание** таблицы **Тип жесткости**.

При работе с жесткостными характеристиками необходимо различать режимы ввода данных и их корректировки. В первом случае выполняется ввод характеристик нового типа жесткости и назначение этого типа элементам схемы, во втором — корректируются ранее введенные характеристики.

### Ввод нового типа жесткости

При вводе нового типа жесткости рекомендуется соблюдать следующий порядок действий:

- на странице **Общие данные** выбрать способ задания жесткостных характеристик и ввести имя типа жесткости;
- указанием на закладку открыть страницу назначения жесткостных характеристик;
- ввести необходимые данные;
- нажать кнопку **ОК** диалогового окна, после чего будет назначен номер типа жесткости и окно закроется;
- выбрать на схеме элементы, которым назначается этот тип жесткости;
- нажать кнопку **ОК** в разделе **Назначения** или клавишу **Enter** на клавиатуре.

Если в момент назначения элементам жесткостных характеристик активен соответствующий фильтр (нажата кнопка  ), то результаты назначения будут показаны на схеме (числами — отображение номера типа жесткости или цветом — цветовой идентификацией элементов).

### Параметрические сечения

Порядок ввода данных не регламентирован, однако, чтобы избежать ошибок, лучше выработать для себя определенную последовательность действий, например такую:

- активировать опцию **Параметрические сечения**;
- перейти на одноименную страницу (рис. 7.1-2);
- выбрать материал из одноименного списка или установить в списке пункт «Другие» и ввести характеристики материала (значения модуля упругости, коэффициента Пуассона и т. д.);
- ввести размеры сечения (обратите внимание, что единицы измерения можно поменять в процессе ввода) и нажать кнопку **Характеристики сечения**, что позволит в окне **Свойства сечения** (рис. 7.1-3) проверить корректность введенных данных;
- выйти из диалогового окна, нажав кнопку **ОК**;
- перейти к назначению заданного типа жесткости элементам схемы.

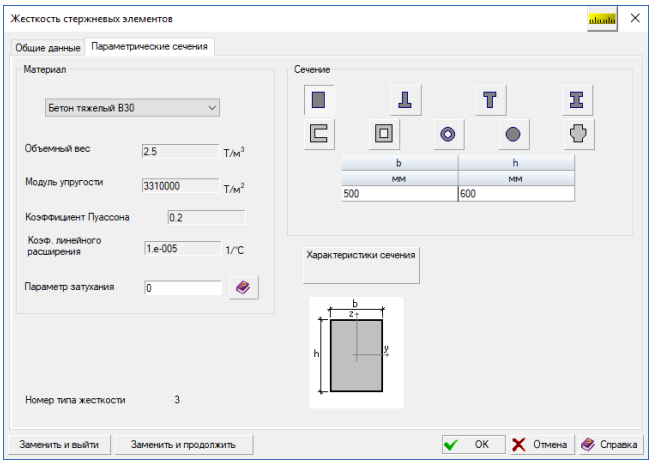



Рис. 7.1-2. *Страница* **Параметрические сечения**

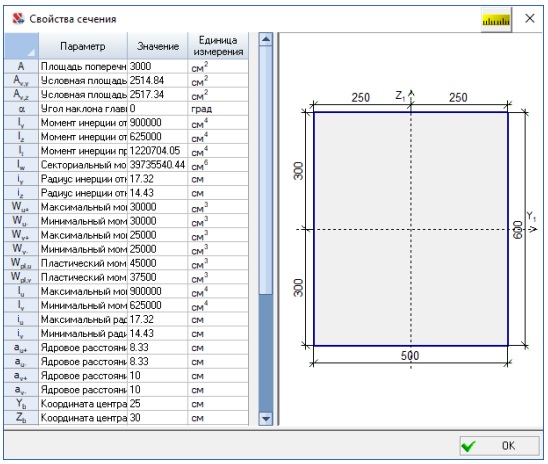



Рис. 7.1-3. *Окно* **Свойства сечения**

### *Численное описание*

Эта страница (рис. 7.1-4) включает максимально необходимый набор полей ввода, позволяющий задать жесткостные характеристики любого типа стержня. В связи с этим, прежде чем ввести значения характеристик, следует активировать маркер с наименованием типа элементов, которым будет назначен этот тип жесткости. После чего открытыми для ввода остаются только те поля, заполнение которых для указанного типа элементов является обязательным или допустимым.

При работе с этой страницей сохраняется описанный выше порядок задания данных и назначения жесткостей элементам схемы:

- активировать опцию **Численное описание**;
- перейти на одноименную страницу (рис. 7.1-4);
- выбрать материал из одноименного списка или установить в списке пункт «Другие» и ввести характеристики материала (значения модуля упругости, коэффициента Пуассона и т. д.);
- активировать маркер с наименованием типа конечных элементов, которым будет присвоен этот тип жесткости;
- заполнить данными открытые для ввода поля;
- выйти из диалогового окна, нажав кнопку **ОК**;
- перейти к назначению заданного типа жесткости элементам схемы.

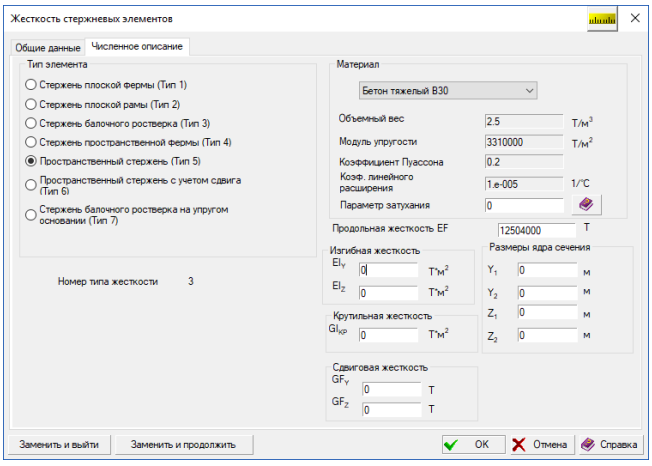



Рис. 7.1-4. *Страница* **Численное описание**

### *Профили металлопроката*

Порядок действий при назначении жесткостных характеристик стержневым элементам, сечение которых берется из сортамента металлопроката, следующий:

- активировать опцию **Профили металлопроката**;
- перейти на одноименную страницу (рис. 7.1-5);

- выбрать вид стали из списка материалов или установить в списке пункт «Другие» и ввести значение удельного веса стали, модуля упругости, коэффициента Пуассона и коэффициента линейного расширения в соответствующие строки группы **Материал**;
- из списка выбрать сортамент, вид и размер профиля;
- выйти из диалогового окна, нажав кнопку **ОК**;
- перейти к назначению заданного типа жесткости элементам схемы.

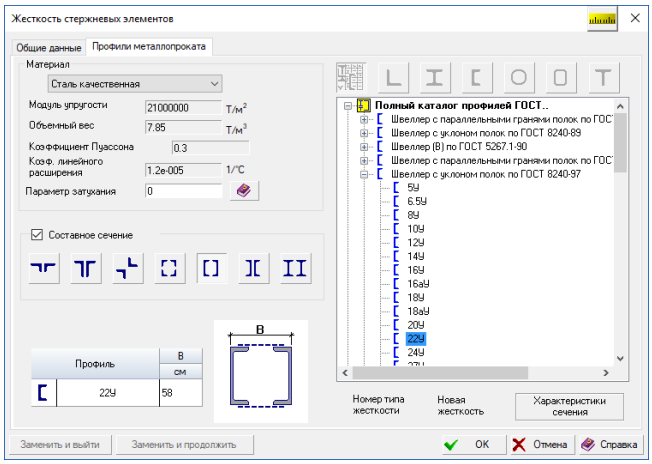



Рис. 7.1-5. *Страница* **Профили металлопроката**

Расположенные над списком профилей кнопки позволяют работать с полным списком профилей (  ) или ограничить список профилями определенного типа (уголки, двутавры, ...).

Полный список сортаментов, включенных в систему **SCAD Office**, приведен в **Приложении**. Их включение в список доступных сортаментов или исключение из него выполняется на странице **Каталоги сечений** диалогового окна **Параметры**, которое активируется из меню ***Настройки***.

Если выбирается составное сечение из прокатных профилей одного из семи видов, предусмотренных в программе, то очередность действий будет следующей:

- активировать на странице **Профили металлопроката** маркер **Составное сечение** и нажать кнопку с изображением требуемого сечения;
- в списке сортаментов выбрать сортамент, вид и размер профилей (доступными будут только те профили, которые входят в состав сечения);
- ввести геометрические параметры компоновки, характерные для выбранного сечения;
- выйти из диалогового окна, нажав кнопку **ОК**;
- перейти к назначению заданного типа жесткости элементам схемы.

При назначении толщины фасонки в сечениях из спаренных уголков желательно придерживаться рекомендаций норм. Например, в СНиП величина зазора ограничивается интервалом 0.8t…2t, где t — толщина уголка.

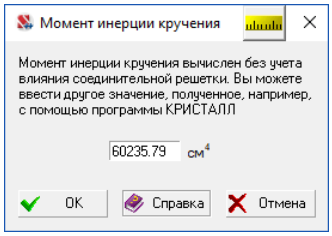



Рис. 7.1-6. *Диалоговое окно* **Момент инерции кручения**

Для сечений из спаренных швеллеров и двутавров момент инерции кручения вычисляется без учета влияния соединительной решетки. Если после задания параметров компоновки нажать кнопку **Характеристики сечения** (рис. 7.1-2), то появится окно **Момент инерции кручения** (рис. 7.1-6) с соответствующим сообщением. В поле ввода этого окна можно ввести уточненное значение момента инерции, полученное, например, с помощью программы **Кристалл**.

### *Численно-параметрическое описание*

Такое описание объединяет два вида представления жесткостных характеристик — в виде параметрических сечений и численное. Это позволяет с одной стороны дать информацию о форме

сечения, а с другой — представить характеристики сечения в виде численного описания. Такое представление жесткостных характеристик может оказаться полезным при подборе арматуры в произвольном сечении, где в процессе расчета используется численное описание такого сечения (например, полученное в конструкторе сечений), а подбор выполняется по правилам, выбранного пользователем параметрического сечения.

Диалоговое окно в этом случае включает три страницы **Общие данные**, **Параметрические сечения** и **Численное описание**. Задание жесткостных характеристик выполняется в указанном порядке следования страниц и полностью совпадает с приведенными выше правилами для одноименных страниц.

### Произвольные сечения

Операция **Произвольные сечения** используется для задания жесткостных характеристик элементам, сечения которых были подготовлены с помощью программ **Конструктор сечений**, **Консул** или **ТОНУС**. При этом рекомендуется придерживаться следующего порядка действий:

- активировать опцию **Произвольные сечения** на странице **Общие данные**;
- на одноименной странице (рис. 7.1-7) в группе **Материал** выбрать материал или установить признак «Другие» и ввести характеристики материала в соответствующие поля ввода;
- в группе **Выбор сечения** нажать кнопку **Выбор** и выполнить поиск нужного сечения (файлы с расширением .sec, .cns или .tns);
- после того, как изображение сечения появится в информационном окне группы **Выбор сечения**, следует нажать кнопку **Применить**, после чего жесткостные характеристики сечения будут записаны в соответствующие поля ввода;
- выйти из диалогового окна, нажав кнопку **ОК**;
- назначить установленный тип жесткости элементам.

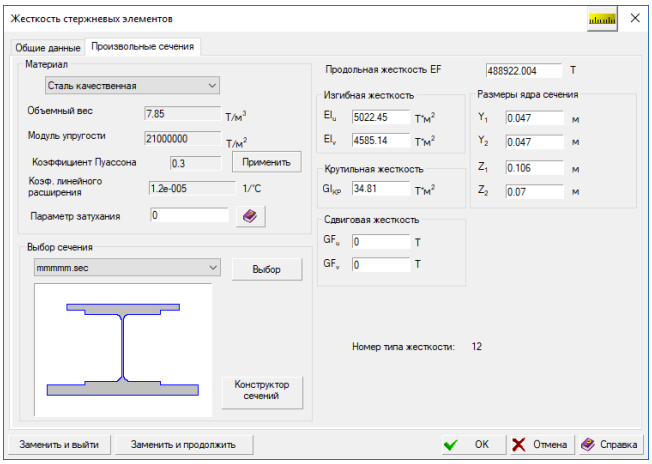



Рис. 7.1-7. *Страница* **Произвольные сечения**

Для сечения произвольной формы, сформированного с помощью одного из конструкторов сечений, известны только максимальный ($\mathbf{I_U}$) и минимальный ($\mathbf{I_V}$) моменты инерции. При использовании кнопки **Применить** величина $EI_U$ попадает в поле ввода $EI_Y$, а величина $EI_V$ — в поле $EI_Z$. Положение главных осей инерции фиксируется при этом углом поворота конструктивных осей, описанном в разделе 3.3

### Переменные сечения

Опция **Переменные сечения** в группе **Способ задания** на странице **Общие данные** используется для задания жесткостных характеристик стержневым элементам, размеры сечений которых меняются вдоль длины стержня. Задание данных о характеристиках жесткости для **Переменных сечений** аналогичен заданию данных для **Параметрических сечений**. Разница состоит в том, что следует задать размеры сечений в начале и в конце стержневого элемента (при этом, предполагается, что вдоль стержня все размеры меняются линейно).

### Сварные сечения

Опция **Сварные сечения** в группе **Способ задания** на странице **Общие данные** используется для задания жесткостных характеристик стержневым элементам, сечения которых изготовлены из листовой стали при помощи сварки.

На странице **Сварные сечения** реализованы такие типы сварных сечений: сварной двутавр (равнополочный и неравнополочный), сварное коробчатое сечение, сварное тавровое сечение (с нижней или с верхней полкой), а также сварное крестовое сечение (см. рис. 7.1-8). В группе **Материал** в выпадающем списке автоматически установлена **Сталь качественная**, для которой заполнены все характеристики материала (значения объемного веса, модуля упругости, коэффициента Пуассона и т. д.). Пользователь может их откорректировать по собственному усмотрению. В таблице, расположенной на этой странице, необходимо ввести размеры сварных сечений: толщины и ширины полок, высоту и толщину стенки/стенок (при этом, единицы измерения можно поменять в процессе ввода). При нажатии кнопки **Характеристики сечений** в окне **Свойства сечения** (рис. 7.1-9) можно проверить корректность введенных исходных данных.

Выход из диалогового окна осуществляется нажатием кнопки **ОК**, после чего необходимо назначить заданный тип жесткости стержневым элементам расчетной модели.

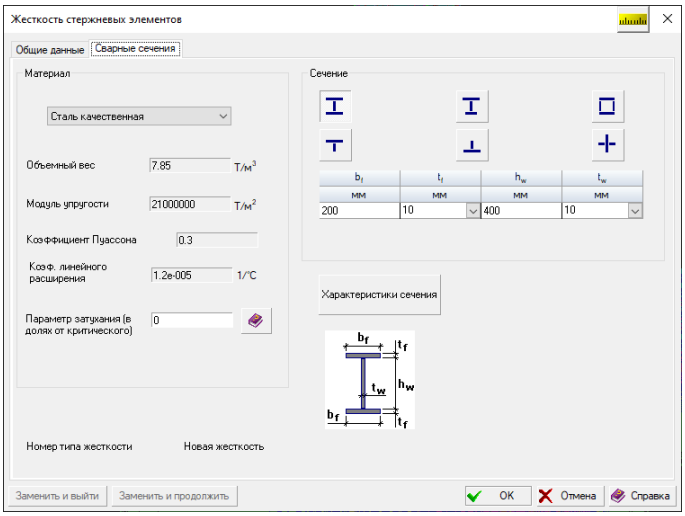



Рис. 7.1-8. *Страница* **Сварные сечения**

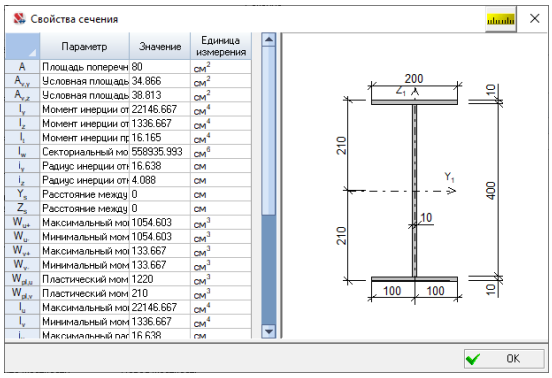



Рис. 7.1-9. *Окно* **Свойства сечения**

### Холодногнутые профили

Опция **Холодногнутые профили** в группе **Способ задания** на странице **Общие данные** используется для задания жесткостных характеристик стержневым элементам, сечения которых приняты из одиночных или составных холодногнутых профилей.

На странице **Холодногнутые профили** реализованы различные типы поперечных сечений стержневых элементов конструкций из холодногнутых профилей, а именно холодногнутые уголки, С-, Z-, сигма- и корыто-образные профили без отгибов на полках, с одинарными и двойными отгибами на полках, различные составные и сквозные сечения из холодногнутых профилей (см. рис. 7.1-10).

В группе **Материал** в выпадающем списке автоматически установлена **Сталь качественная**, для которой заполнены все характеристики материала (значения объемного веса, модуля упругости, коэффициента Пуассона и т. д.). Пользователь может их откорректировать по собственному усмотрению. В таблице, расположенной на этой же странице, необходимо ввести размеры сечений из холодногнутых профилей. При нажатии кнопки **Характеристики сечений** в окне **Свойства сечения** (рис. 7.1-11) можно проверить корректность введенных исходных данных.

Выход из диалогового окна осуществляется нажатием кнопки **ОК**, после чего необходимо назначить заданный тип жесткости стержневым элементам расчетной модели.

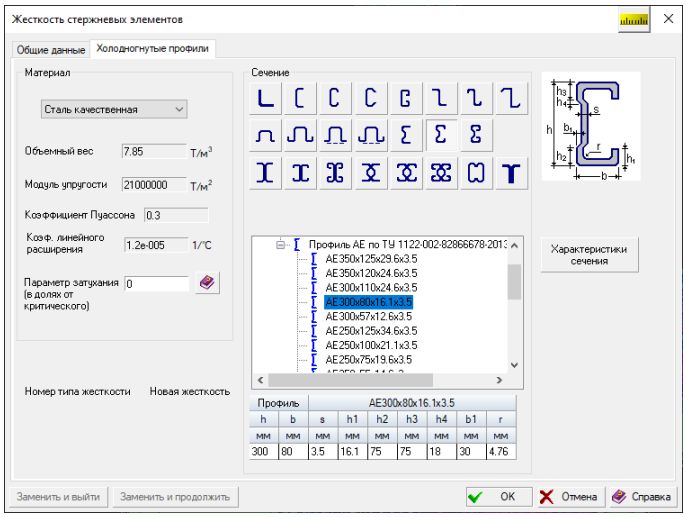



Рис. 7.1-10. *Страница* **Холодногнутые профили**

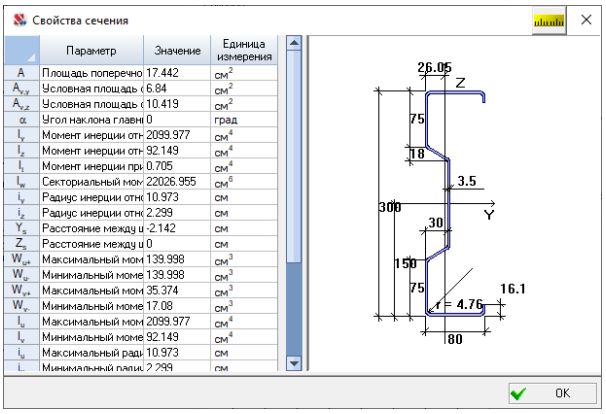



Рис. 7.1-11. *Окно* **Свойства сечения**

### *Деревянные сечения*

Опция **Деревянные сечения** в группе **Способ задания** на странице **Общие данные** используется для задания жесткостных характеристик стержневым элементам, сечения которых изготовлены из древесины.

На странице **Деревянные сечения** реализованы такие формы сечений: прямоугольник, равнополочный двутавр и круг. В группе **Материал** в выпадающем списке автоматически установлена **Древесина**, для которой заполнены усредненные характеристики материала (значения объемного веса, модуля упругости, коэффициента Пуассона и т. д.). Кнопка  позволяет активировать диалоговое окно, в котором можно выбрать породу древесины и получить механические свойства на основании выбранных норм проектирования деревянных конструкций.

Выход из диалогового окна осуществляется нажатием кнопки **ОК**, после чего необходимо назначить заданный тип жесткости стержневым элементам расчетной модели.

### *Редуцирование жесткостей*

Кнопка **Коэффициенты редуцирования** позволяет вызвать диалог, в котором можно задать коэффициенты редуцирования для продольной, изгибных жесткостей, ... и тем самым учесть эффекты, связанные со снижением жесткости в результате образования трещин (см. например, п. А.8.6 СП 5.03.01-2020).

### *Корректировка выбранного сечения*

Для корректировки в процессе задания жесткостных характеристик сечения, сформированного ранее одним из конструкторов сечений и использованного для задания жесткости элементам схемы, необходимо:

- на странице **Произвольные сечения** нажать кнопку **Конструктор сечений**, после чего будет вызвана программа формирования сечений, использованная при создании корректируемого сечения;
- внести необходимые изменения в сечение и сохранить откорректированное сечение под тем же именем, что и исходное;
- закрыть программу формирования сечений, после чего управление вернется на страницу **Произвольные сечения** (отображение откорректированного сечения появится в информационном окне);
- после нажатия кнопки **Применить** жесткостные характеристики сечения будут пересчитаны с учетом выполненных изменений;
- выйти из диалогового окна, нажав кнопку **ОК**;
- назначить установленный тип жесткости элементам.

### Корректировка характеристик ранее заданного типа жесткости

Для корректировки характеристик ранее заданного типа жесткости следует:

- активировать операцию **Назначение жесткостей стержням**;
- в таблице **Тип жесткости** выбрать строку с номером корректируемого типа жесткости;
- откорректировать характеристики (в том числе допускается изменение способа задания жесткости, имени типа жесткости и др.);
- нажать одну из кнопок замены — **Заменить и выйти** или **Заменить и продолжить**. В первом случае после замены характеристик диалоговое окно будет закрыто, а во втором — можно продолжить корректировку других типов жесткости.

После выполнения описанных выше действий номер типа жесткости не меняется. Если после корректировки параметров воспользоваться кнопкой **ОК**, то будет сформирован новый тип жесткости, а характеристики ранее заданного типа останутся неизменными.



Следует учесть, что выход из диалогового окна **Жесткость стержневых элементов** нажатием кнопки **Заменить и выйти**, не позволяет выполнить назначение измененных параметров другим элементам схемы. Такая операция допустима только после выхода из диалогового окна нажатием кнопки **ОК**.

### Назначение элементам типа жесткости, заданного ранее

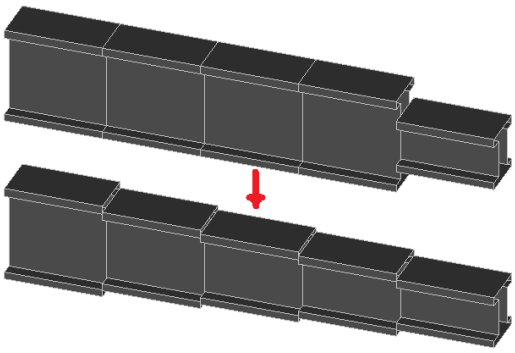
Для назначения элементам ранее заданного типа жесткости, следует:

- активировать операцию **Назначение жесткостей стержням**;
- в таблице **Тип жесткости** выбрать строку с номером необходимого типа жесткости;
- выйти из окна нажатием кнопки **ОК**;
- назначить выбранный тип жесткости элементам схемы.

## Линейное изменение размеров сечений стержневых элементов



Операция позволяет изменить размеры сечений стержневых элементов, жесткости которых заданы параметрически. В результате выполнения операции геометрические размеры промежуточных стержней цепочки стержней будут изменены в соответствии с линейной интерполяцией размеров сечений ее крайних элементов, позволяет моделировать стержень переменного сечения. Пример такого преобразования приведен на рисунке ниже.



Для выполнения операции следует активировать ее в инструментальной панели **Назначение**, выбрать цепочку стержней, лежащих на одной прямой, и нажать кнопку **ОК**.

## Назначение жесткостных характеристик пластинчатым элементам



Для назначения жесткостных характеристик элементам оболочки, плиты и балки–стенки используется диалоговое окно **Жесткости пластин** (рис. 7.1-12).

Порядок действий при назначении жесткостных характеристик пластинчатым элементам при выполнении линейного расчета, следующий:

а) изотропный материал:
- активировать операцию **Жесткости пластин**;
- выбрать материал из списка или установить в списке материалов признак «**Другие**» и ввести характеристики материала в соответствующие строки группы материал (в этом случае кнопка  позволяет активировать диалоговое окно, в котором можно выбрать характеристики каменной кладки и получить механические свойства на основании выбранных норм проектирования каменных конструкций);
- назначить толщину пластины;
- указать с помощью маркера свойство материала — **Изотропия**;
- выбрать задачу теории упругости, по которой выполняется расчет — **Плосконапряженное состояние** (эта теория принята по умолчанию) или **Плоская деформация**;
- выйти из диалогового окна, нажав кнопку **ОК**;
- перейти к назначению заданного типа жесткости элементам схемы;

б) ортотропный материал:
- активировать операцию **Жесткости пластин**;
- указать с помощью маркера свойство материала — **Ортотропия** (в диалоговом окне станет доступной одноименная страница);
- назначить толщину пластины;
- выбрать режим работы конструкции — **Плосконапряженное состояние** (эта теория принята по умолчанию) или **Плоская деформация**;
- на странице **Ортотропия** (рис. 7.1-13) задать значения модулей упругости, коэффициентов Пуассона и коэффициентов линейного расширения по направлениям $X_1$ и $Y_1$, а также значение модуля сдвига (заданные значения должны удовлетворять условиям симметрии, описанным в разделе 0);
- выйти из диалогового окна, нажав кнопку **ОК**;
- перейти к назначению заданного типа жесткости элементам схемы.

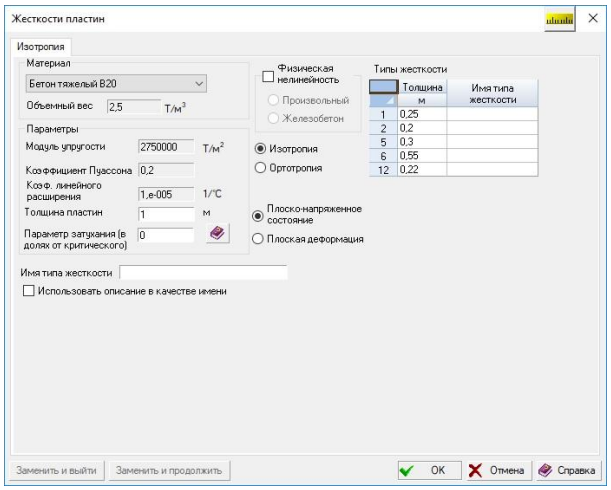



Рис. 7.1-12. *Диалоговое окно* **Жесткости пластин**, *страница* **Изотропия**

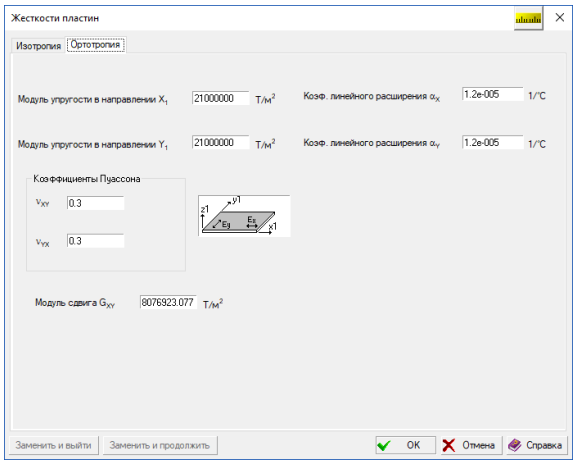



Рис. 7.1-13. *Диалоговое окно* **Жесткости пластин**, *страница* **Ортотропия**

в) конструктивная ортотропия (Пластинчатые аналоги конструктивно ортотропных ребристых оболочек и систем перекрестных балок)

Оболочки, усиленные часто поставленными ребрами, а также решетки, составленные из жестко соединенных между собой перекрестных балок, можно смоделировать ортотропной пластиной. Предполагается, что материал моделируемой конструкции характеризуется модулем упругости $E$ и коэффициентом Пуассона μ, подкрепляющие ребра ортогональны друг другу. Следует отметить, что ошибки такого моделирования возрастают по мере увеличения расстояния между ребрами.

При построении континуальной модели регулярную систему часто расположенных ребер заменяют условным сплошным слоем, обладающим приведенными жесткостными характеристиками.

**Ниже рассматриваются конструктивные решения, реализованных в программе типов конструктивной ортотропии.** При выполнении расчетов они представляются эквивалентными по жесткости плоскими плитами, располагаемыми на уровне центра тяжести исходного сечения.

## Подготовка исходных данных

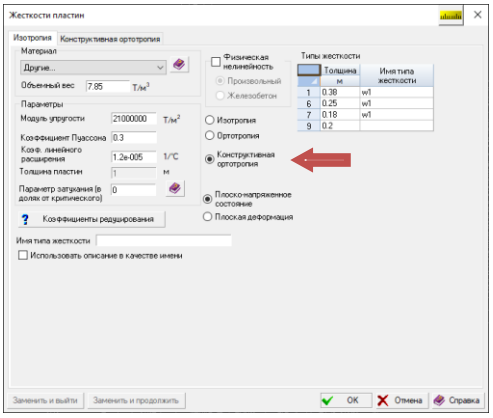
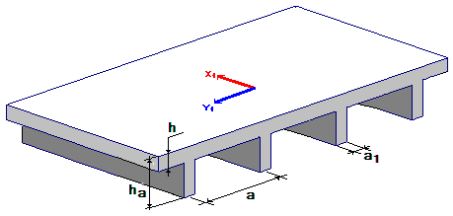



Рис. 7.1-14. *Диалоговое окно* **Жесткости пластин**

После активации операции **Назначение жесткости пластин** открывается соответствующее диалоговое окно, в котором следует выполнить следующие действия:

- активировать маркер **Конструктивная ортотропия**;
- из одноименного списка выбрать материал или задать характеристики материала в случае выбора опции **Другие**;
- перейти на страницу **Конструктивная ортотропия**, где из выпадающего списка выбрать необходимый вариант ортотропной пластины;
- в таблицу внести параметры пластины и ребер;
- выйти из окна, нажатием кнопки **ОК**, выбрать на схеме элементы и нажать кнопку **ОК** инструментальной панели **Назначения**.

**Односторонние, однонаправленные ребра**

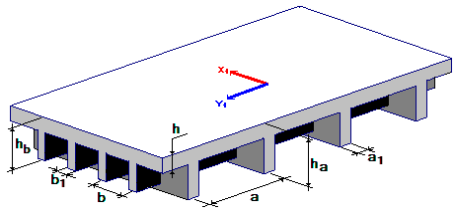



Ребра направлены вдоль местной оси ортотропии $x_1$. При задании исходных данных действуют следующие ограничения:

$$a \geq 3*a_1;$$
$$h_a > h\ .$$

Рис. 7.1-15. Однонаправленные ребра

**Односторонние, двунаправленные ребра**

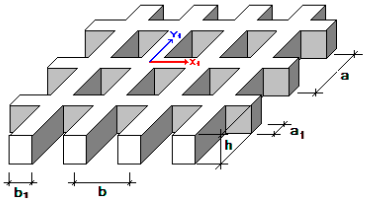



Ребра с шагом *a* направлены вдоль местной оси ортотропии $x_1$. (рис. 7.1-16). При задании исходных данных действуют следующие ограничения:

$$a \geq 3*a_1;$$
$$b \geq 3*b_1;$$
$$h_a > h;$$
$$h_b > h.$$

Рис. 7.1-16. Двунаправленные ребра

**Балочная клетка**

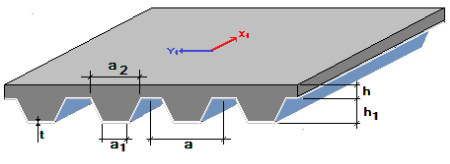



Ребра с шагом *a* направлены вдоль местной оси ортотропии $x_1$. (рис. 7.1-17). При задании исходных данных действуют следующие ограничения:

$$a \geq 3*a_1;$$
$$b \geq 3*b_1.$$

Рис. 7.1-17. Балочная клетка

**Трапецеидальная плита (модель профнастила)**




Ребра направлены вдоль местной оси ортотропии $x_1$. (Рис. 7.1-18). При задании исходных данных действуют следующие ограничения:

$$a \geq 3*a_1;$$
$$b \geq 3*b_1.$$

Рис. 7.1-18

Для корректировки характеристик ранее заданного типа жесткости следует:

- активировать операцию **Жесткости пластин**;
- в таблице **Тип жесткости** выбрать строку с номером корректируемого типа жесткости;
- откорректировать заданные ранее характеристики;
- нажать одну из кнопок замены — **Заменить и выйти** или **Заменить и продолжить**. В первом случае после замены характеристик диалоговое окно будет закрыто, а во втором — можно продолжить корректировку других типов жесткости.

После выполнения описанных выше действий номер типа жесткости не меняется.

Если после корректировки параметров воспользоваться кнопкой **ОК**, то будет сформирован новый тип жесткости, а характеристики ранее заданного типа останутся неизменными.

### Редуцирование жесткостей

Кнопка **Коэффициенты редуцирования** позволяет вызвать диалог, в котором можно задать коэффициенты редуцирования для изгибных и мембранных жесткостей и тем самым учесть эффекты, связанные со снижением жесткости в результате образования трещин (см. например, п. А.8.6 СП 5.03.01-2020).

## Назначение жесткостных характеристик объемным элементам



Ввод жесткостных характеристик выполняется в диалоговом окне **Жесткость объемных элементов** (рис. 7.1-19). Если материал изотропный, то характеристики включают четыре параметра (модуль упругости, коэффициент Пуассона, удельный вес и коэффициент линейного расширения) и в этом случае может быть рекомендован следующий порядок действий:

- активировать операцию **Назначение жесткостей объемным элементам**;
- в диалоговом окне **Жесткость объемных элементов** выбрать материал из списка или установить в списке материалов признак «Другие» и ввести характеристики материала в соответствующие строки группы материал;
- указать с помощью маркера свойство материала — **Изотропия** (активно по умолчанию);
- выйти из диалогового окна, нажав кнопку **ОК**;
- перейти к назначению заданного типа жесткости элементам схемы.

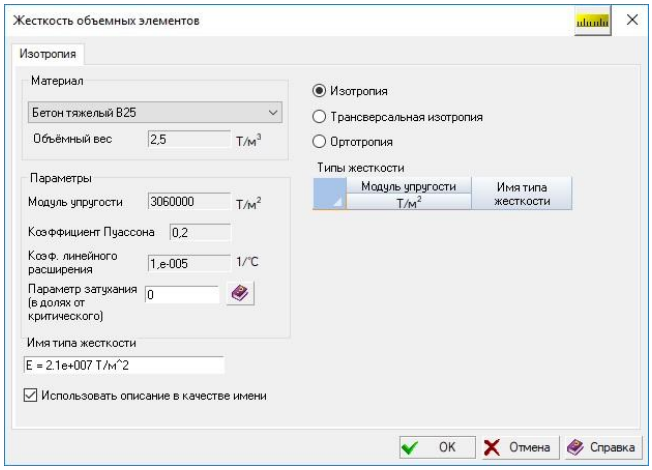



Рис. 7.1-19. *Диалоговое окно* **Жесткость объемных элементов**

В случае, когда рассматривается трансверсальная изотропия, в окне добавляется одноименная страница (рис. 7.1-20), на которой задаются характеристики материала.

Аналогичная страница, но с соответствующим набором характеристик (рис. 7.1-21), появляется и в случае задания ортотропных свойств материала (заданные значения должны удовлетворять условиям симметрии, описанным в разделе 3.5).

Для корректировки характеристик ранее заданного типа жесткости следует:

- активировать операцию **Жесткость объемных элементов**;
- в таблице **Тип жесткости** выбрать строку с номером корректируемого типа жесткости;
- откорректировать заданные ранее характеристики;
- нажать одну из кнопок замены — **Заменить и выйти** или **Заменить и продолжить**. В первом случае после замены характеристик диалоговое окно будет закрыто, а во втором — можно продолжить корректировку других типов жесткости.

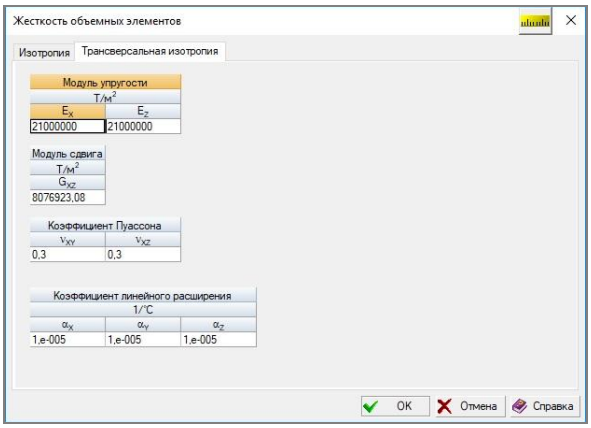



Рис. 7.1-20. *Страница* **Трансверсальная изотропия**

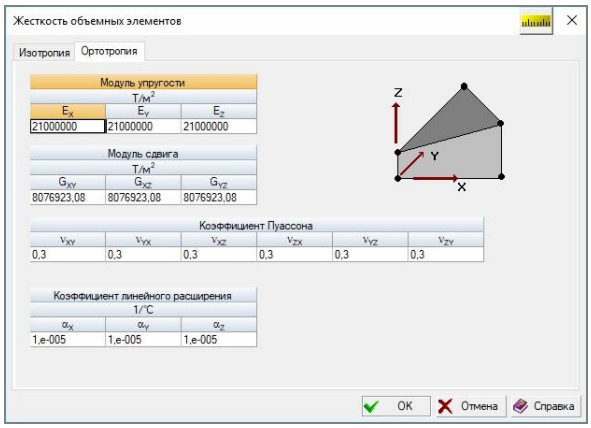



Рис. 7.1-21. *Страница* **Ортотропия**

После выполнения описанных выше действий номер типа жесткости не меняется.

Если после корректировки параметров воспользоваться кнопкой **ОК**, то будет сформирован новый тип жесткости, а характеристики ранее заданного типа останутся неизменными.

## Назначение жесткостных характеристик многослойным элементам



Эта операция используется для задания жесткостных характеристик многослойным элементам (схема, содержащая многослойные элементы, должна иметь тип 8 или 9).

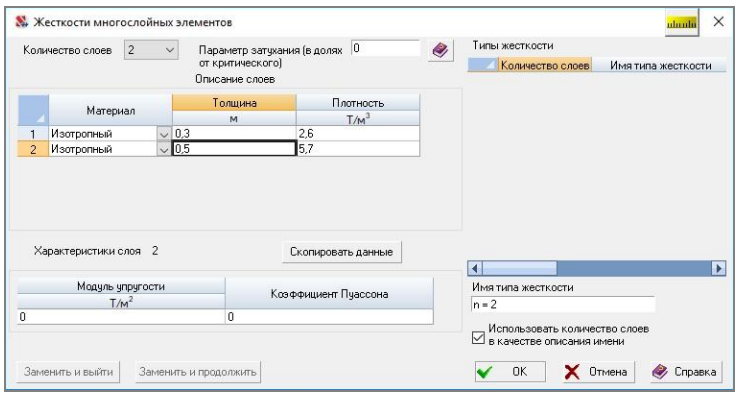



Рис. 7.1-22. *Диалоговое окно* **Жесткости многослойных элементов**

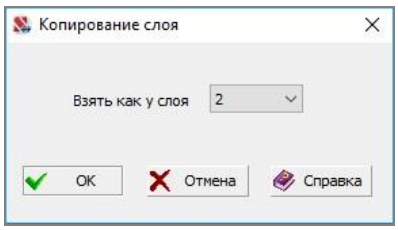



Рис. 7.1-23. *Диалоговое окно* **Копирование слоя**

В результате ее активации появляется диалоговое окно **Жесткости многослойных элементов** (рис. 7.1-22). Порядок задания данных в этом окне следующий:

- выбрать из списка количество слоев в элементах данного типа жесткости;
- в таблице **Описание слоев** в графе **Материал** назначить (выбрать из списка) для каждого слоя свойства материала, в графе **Толщина** задать толщину слоя, а в графе **Плотность** — плотность материала слоя;
- в таблице **Описание слоев** выбрать строку с номером слоя, для которого задаются жесткостные характеристики;
- заполнить таблицу с характеристиками выбранного слоя, задав значения модуля упругости и коэффициента Пуассона;
- выбрать в таблице **Описание слоев** номер следующего слоя и повторить описанные выше действия по заданию характеристик;
- нажать кнопку **ОК** и перейти к назначению элементам схемы описанного типа жесткости.

Если характеристики очередного слоя совпадают с характеристиками заданными ранее для другого слоя, то для их назначения можно воспользоваться кнопкой **Скопировать данные**. После

нажатия этой кнопки появляется диалоговое окно **Копирование слоя** (рис. 7.1-23), в списке которого и выбирается номер исходного слоя.

Для корректировки характеристик ранее заданного типа жесткости следует:

- активировать операцию **Жесткости многослойных элементов**;
- в таблице **Тип жесткости** выбрать строку с номером корректируемого типа жесткости;
- откорректировать заданные ранее характеристики;
- нажать одну из кнопок замены — **Заменить и выйти** или **Заменить и продолжить**. В первом случае после замены характеристик диалоговое окно будет закрыто, а во втором — можно продолжить корректировку других типов жесткости.

После выполнения описанных выше действий номер типа жесткости не меняется.

Если после корректировки параметров воспользоваться кнопкой **ОК**, то будет сформирован новый тип жесткости, а характеристики ранее заданного типа останутся неизменными.

## Назначение жесткостных характеристик осесимметричным элементам



При расчете конструкций, которые моделируются осесимметричными элементами (тип схемы 11), жесткостные характеристики элементов задаются в диалоговом окне **Жесткости осесимметричных элементов** (рис. 7.1-24).

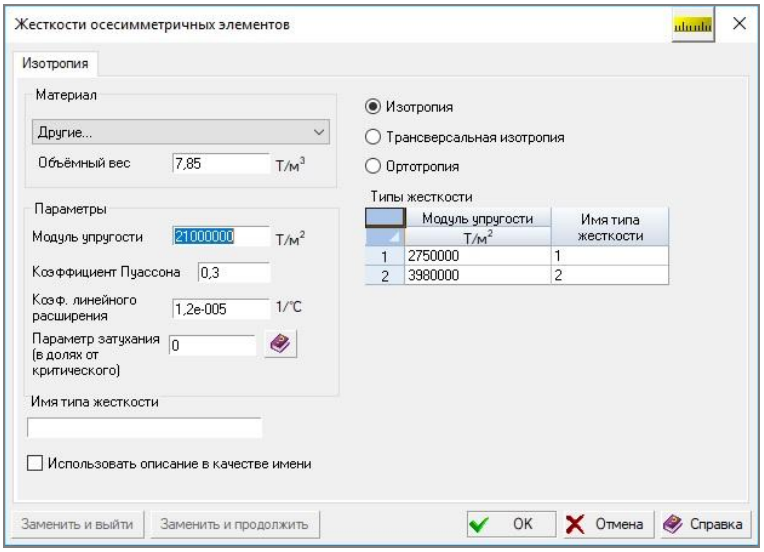



Рис. 7.1-24. *Диалоговое окно* **Жесткости осесимметричных элементов**

Для задания жесткостей осесимметричным элементам может быть рекомендован следующий порядок действий:

- активировать операцию **Жесткости осесимметричных элементов**;
- в одноименном диалоговом окне выбрать материал из списка или установить в списке материалов признак «Другие» и ввести характеристики материала в соответствующие строки группы материал;
- указать с помощью маркера свойство материала — **Изотропия** (активно по умолчанию);
- выйти из диалогового окна, нажав кнопку **ОК**;
- перейти к назначению заданного типа жесткости элементам схемы.

В случае, когда рассматривается трансверсальная изотропия, в окне добавляется одноименная страница (рис. 7.1-25), на которой задаются характеристики материала. Аналогичная страница, но с соответствующим набором характеристик (рис. 7.1-26), появляется и в случае задания ортотропных свойств материала.

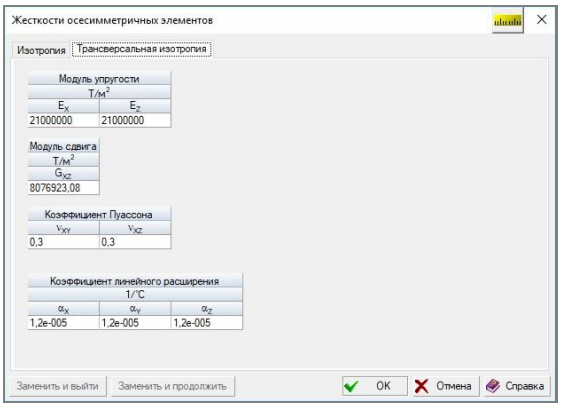



Рис. 7.1-25. *Страница* **Трансверсальная изотропия**

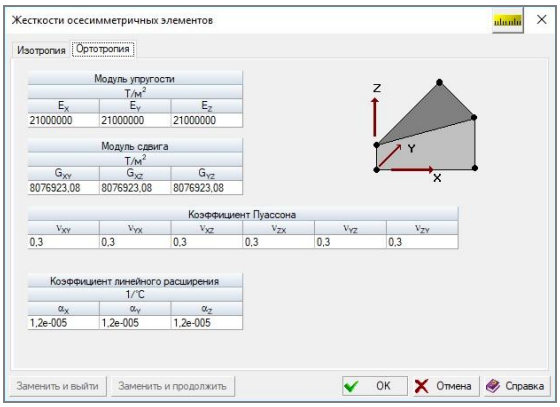



Рис. 7.1-26. *Страница* **Ортотропия**

Для корректировки характеристик ранее заданного типа жесткости следует:
- активировать рассматриваемую операцию;
- в таблице **Тип жесткости** диалогового окна **Жесткости осесимметричных элементов** выбрать строку с номером корректируемого типа жесткости;
- откорректировать заданные ранее характеристики;
- нажать одну из кнопок замены — **Заменить и выйти** или **Заменить и продолжить**. В первом случае после замены характеристик диалоговое окно будет закрыто, а во втором — можно продолжить корректировку других типов жесткости.

После выполнения описанных выше действий номер типа жесткости не меняется.

Если после корректировки параметров воспользоваться кнопкой **ОК**, то будет сформирован новый тип жесткости, а характеристики ранее заданного типа останутся неизменными.

## 7.2. Назначение жесткостных характеристик специальным конечным элементам



Как правило, жесткостные характеристики специальным конечным элементам задаются при их вводе. Рассматриваемая операция может использоваться как для переназначения жесткостных характеристик ранее введенным специальным конечным элементам, так и для задания элементам соответствующих жесткостных характеристик после смены типа конечного элемента (например, после замены типа у стержневого элемента на элемент упругой связи).

При задании жесткостных характеристик специальным конечным элементам после смены типа элемента рекомендуется следующий порядок действий при выполнении этой операции:
- активировать операцию и в появившемся выпадающем списке отметить строку с наименованием нужного типа специального элемента (в списке будут доступны только те строки, которые содержат наименования элементов, присутствующих в схеме);
- в появившемся диалоговом окне задать характеристики жесткости или выбрать их в списке **Тип жесткости**;
- нажать кнопку **ОК** и выполнить назначение жесткости элементам схемы.

Для корректировки характеристик ранее заданного типа жесткости следует:
- активировать рассматриваемую операцию;
- в таблице **Тип жесткости** диалогового окна **Жесткости элементов** выбрать строку с номером корректируемого типа жесткости;
- откорректировать заданные ранее характеристики;
- нажать одну из кнопок замены — **Заменить и выйти** или **Заменить и продолжить**. В первом случае после замены характеристик диалоговое окно будет закрыто, а во втором — можно продолжить корректировку других типов жесткости.

После выполнения описанных выше действий номер типа жесткости не меняется.

### Цветовая индикация жесткостей

Несмотря на то, что цветовые шкалы рассматриваются в отдельном разделе (см. главу 4), здесь (для справки) приводится краткое описание цветовой шкалы жесткостей.

Окно цветовой шкалы для индикации жесткостей элементов вызывается из панели фильтров отображения (см. раздел 10.2) и включает таблицу с данными и набор кнопок управления. Таблица состоит из семи граф, в которых расположены:

- маркеры — для включения/отключения отображения цветом данного типа жесткости;
- номера типов жесткости;
- цветовое поле, показывающее цвет отображения данного типа жесткости на схеме;
- условное обозначение вида элемента или его сечения;
- габарит сечения, толщина пластины или другие параметры, характеризующие данный тип жесткости;
- имя типа жесткости, заданное пользователем;
- количество элементов с данным типом жесткости в схеме.

Расположенные в верхней части цветовой шкалы кнопки позволяют локализовать выбор отображаемых в цвете типов жесткости в зависимости от вида элементов и способа описания жесткостей:

 — параметрическое задание сечений стержневых элементов;

 — сечения из каталогов профилей стального проката;

 — сечения из прокатных профилей и листов, сформированные в **Конструкторе сечений**;

 — численно-параметрическое задание жесткостей стержневых элементов;

 — численное описание жесткостей стержневых элементов;

 — пластинчатые элементы;

 — объемные элементы;

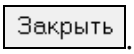
 — специальные конечные элементы (упругие связи, связи конечной жесткости и т. п.).

Если одна или несколько перечисленных кнопок будут активны, то в цветовой шкале будут активны и соответствующие им номера (маркеры) типов жесткости. По умолчанию все кнопки считаются активными (рис. 7.2-1, *а*). Кнопка  включает или отключает все кнопки одновременно. Кнопки могут использоваться в любой комбинации.

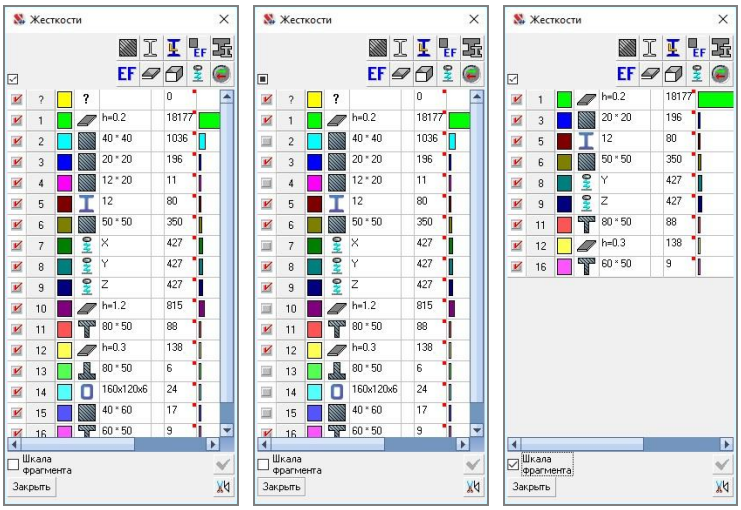
Маркер, установленный над маркерами типов жесткости, позволяет одновременно включить или отключить все маркеры цветовой шкалы.

Для отображения цветом на схеме элементов с жесткостями, соответствующими выбранной комбинации кнопок (рис. 7.2-1, *б*), следует нажать кнопку **Применить** —  , а для получения фрагмента, включающего только эти элементы, — кнопку **Фрагментировать** —  .

Если в текущем окне отображается не вся схема, а только ее часть (выполнена фрагментация расчетной схемы), то набор типов жесткости в цветовой шкале может быть ограничен только теми номерами, которые входят в текущий фрагмент. Для переключения шкалы используется маркер **Шкала фрагмента** (рис. 7.2-1, *в*).

Для завершения работы с цветовой шкалой используется кнопка 

.




*а*) *б*) *в*)

Рис. 7.2-1. *Цветовая шкала* **Жесткости**

## Удаление дублирующихся типов жесткости

При работе со схемой могут появляться «дублирующиеся типы жесткости», т. е. такие, которые имеют одинаковые параметры и отличаются только номерами. После выполнения рассматриваемой операции всем элементам, имевшим одинаковые параметры, автоматически присваивается общий номер типа жесткости.




Рис. 7.2-2. *Операция удаления дублирующихся типов жесткости*

Если дублирующимся типам жесткости были присвоены разные имена, то результат выполнения операции будет зависеть от ответа на запрос в окне сообщений (рис. 7.2-2). При положительном ответе жесткости будут приведены к единому (минимальному) номеру, с соответствующим ему именем. В противном случае сжатие не выполняется.

Одновременно с удалением дублирующихся типов жесткости производится удаление дублирующихся типов коэффициентов упругого основания.

## Перенумерация жесткостей

Операция используется для сортировки/перенумерации жесткостей в расчетной схеме.

Активация операции приводит к появлению одноименного диалогового окна (см. рис. 7.2-3), со списком жесткостей. Графы таблицы включают:

- текущий номер жесткости;
- **№** — номер жесткости в порядке создания;

- **Тип** — пиктограмма типа жесткости;
- **Имя** — жесткости;
- **Описание** — описание жесткости;
- **Количество элементов**, которые имеют соответствующие жесткостные характеристики.

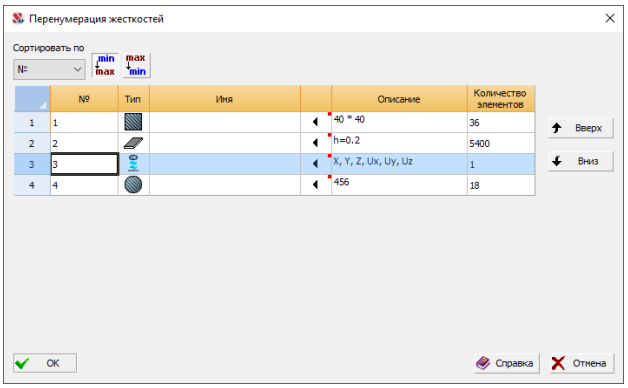



Рис. 7.2-3. *Диалоговое окно* **Перенумерация жесткостей**

Характеристика жесткости, относительно которой выполняется сортировка, выбирается из списка **Сортировать по**. Предусмотрены следующие виды сортировок:

- по номеру (в очередности создания жесткости — при нажатой кнопке **Min/Max**; и наоборот — при нажатой кнопке **Max/Min**);
- по типу жесткости;
- по имени жесткости (в алфавитном порядке при нажатой кнопке **Min/Max** и наоборот — при нажатой кнопке **Max/Min**);
- по описанию жесткости (в алфавитном порядке при нажатой кнопке **Min/Max** и наоборот — при нажатой кнопке **Max/Min**);
- по количеству элементов (по возрастанию количества элементов при нажатой кнопке **Min/Max** и наоборот — при нажатой кнопке **Max/Min**).

Для изменения положения в списке одной или нескольких жесткостей необходимо отметить нужные строки и переместить их по списку на нужное количество позиций нажатием на кнопки **Вверх** и **Вниз**.

Кроме того, в данном диалоговом окне можно произвести переименование типов жесткостей или с помощью кнопки ◧ указать, что следует использовать в качестве имени описание жесткости.

Все назначения, сделанные в диалоговом окне, будут зафиксированы и выполнены после выхода из окна по нажатию кнопки **OK**. При этом положение жесткостей будет соответствовать их положению в списке диалогового окна.

## Физико-механические свойства материалов

При вводе жесткостных характеристик могут быть назначены автоматически такие свойства материалов, как модуль упругости, объемный вес, коэффициент Пуассона. Выпадающий список со списком материалов (рис. 7.2-4) находится в разделе **Материал** диалоговых окон (рис. 7.2-5). Если выбрать нужный материал, то все данные будут взяты из базы данных, поставляемой с программой. Для контроля программа показывает свойства выбранного материала (модуль упругости, коэффициент Пуассона, …).

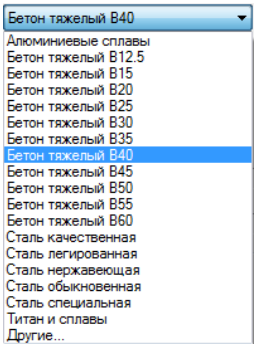



Рис. 7.2-4. *Выпадающий список* **Материалы**

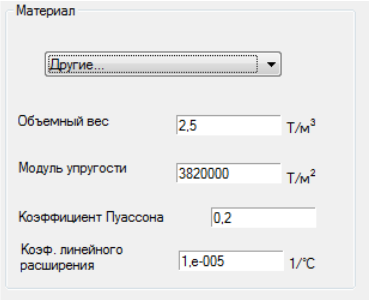



Рис. 7.2-5. *Раздел* **Материал**

Добавить, изменить или удалить данные из базы данных материалов можно с помощью программы **Редактор материалов**, входящей в состав пакета **SCAD Office**. Если выбрать последний пункт в списке “Другие...”, то в соответствующих окнах ввода появится возможность ввести данные о механических свойствах требуемого материала, который отсутствует в базе. Естественно, перед расчетом программа произведет контроль правильности введенной информации (например, нельзя задать коэффициент Пуассона больше 0.5, …).

## 7.3. Задание свойств элементов

### Назначение типа элемента



Эта операция позволяет назначить или заменить тип конечных элементов. При назначении типа элемента используется одноименное диалоговое окно (рис. 7.3-1), которое вызывается нажатием соответствующей кнопки в разделе **Назначения** инструментальной панели (см. рис. 7-1).

В этом окне следует выполнить такие действия:

- активировать опцию с наименованием соответствующего вида элементов (стержень, оболочка, и т. д.);
- выбрать необходимый тип элемента в списке;
- нажать кнопку **ОК** диалогового окна;
- выбрать на схеме элементы, которым назначается выбранный тип, и выполнить назначение, нажав кнопку **ОК** в инструментальной панели.

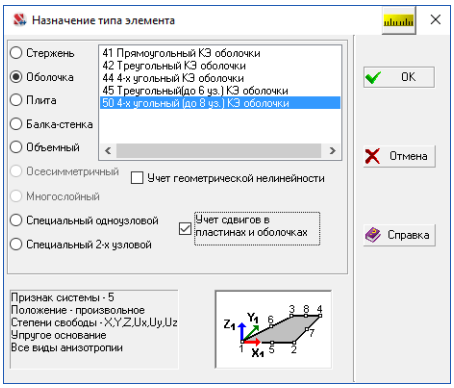



Рис. 7.3-1. *Диалоговое окно* **Назначение типа элемента**

При включенном маркере **Учет геометрической нелинейности** выбранным элементам будет назначен тип, позволяющий выполнить расчет с учетом больших перемещений.

При назначении типа элементам оболочки, балки-стенки и плиты можно активировать опцию **Учет сдвигов в пластинах и оболочках**. При этом вместо указанного типа элемента будет назначен соответствующий ему элемент (номер типа увеличивается на 100), позволяющий учесть сдвиг по теории Рейсснера-Миндлина.

Перед тем, как назначить тип элемента, обратите внимание на краткое описание, которое выводится в информационном поле диалогового окна после выбора элемента из списка, а также на пиктограмму с изображением местных осей элемента.

Тип элемента должен соответствовать установленному типу расчетной схемы. Правильный выбор типа элемента позволит избежать ошибок при решении задачи.

**Установленный тип будет назначен только тем элементам, которые имеют количество узлов, соответствующее описанию элемента в главе 3.**

## Назначение нелинейных элементов



При инициации операции появляется выпадающее меню, в котором предлагается выбрать тип нелинейного расчета (геометрическая или физическая нелинейность).

После этого следует выбрать на схеме элементы и нажать кнопку **ОК** в инструментальной панели. Выбранные элементы предназначены для учета больших перемещений или физической нелинейности при выполнении нелинейного расчета. Номера типов элементов будут образованы путем добавления к номеру типа линейного элемента числа 300 (в случае геометрической нелинейности) или 400 (в случае физической нелинейности). Например, элемент типа 44 будет преобразован в 344 (или 444) и т. п.

## Установка или удаление абсолютно жестких вставок



Операция используется для назначения абсолютно жестких вставок (недеформируемых частей) стержневым элементам. Жесткие вставки могут описываться двумя способами: в общей системе координат расчетной схемы или в местной системе координат элемента. Для ввода характеристик жестких вставок используется диалоговое окно **Жесткие вставки** (рис. 7.3-2), в котором следует назначить способ описания вставок и ввести их длины.

При вводе в местной системе координат местная ось $X_2$ элемента проходит от узла 1 к узлу 2, а длины жестких вставок задаются в виде длин проекций на соответствующие местные оси. Если жесткая вставка задана в местных осях и при этом значение длины проекции вдоль оси $X_1$ не равно нулю, а вдоль осей $Y_1$ и $Z_1$ заданы нулевые значения, то длина проекции по оси $X_1$ (фактически, длина жесткой вставки) должна быть задана положительным числом. Это правило принято, исходя из того, что происходящее в этом случае наложение жесткой вставки на гибкую часть стержня физически лишено смысла. При вводе данных в общей системе координат программа контролирует факт наложение жесткой вставки на гибкую часть в процессе расчета и автоматически меняет направление вставки.

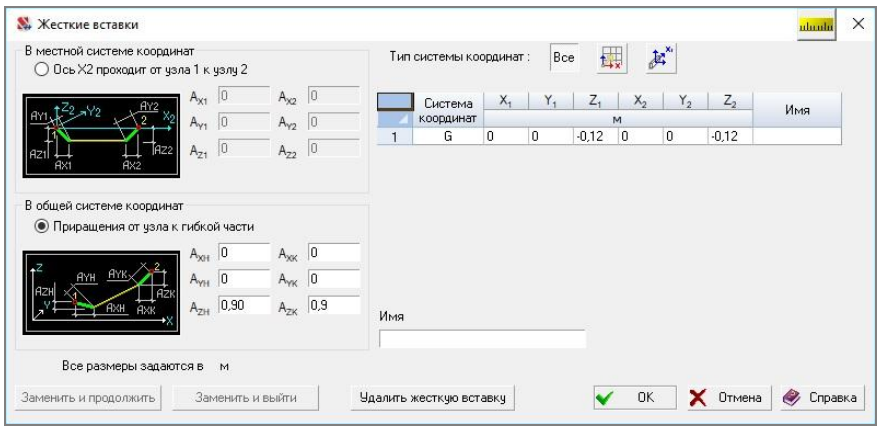



Рис. 7.3-2. *Диалоговое окно* **Жесткие вставки**

При вводе в общей системе координат длины жестких вставок задаются в виде проекций на оси общей системы координат, т. е. как векторы, направленные от узла к гибкой части стержня. Для ввода жестких вставок следует выполнить следующие действия:

– активировать операцию **Установка-удаление жестких вставок**;

- с помощью маркера выбрать способ описания вставки — в местной системе координат стержня или в общей системе координат;
- при необходимости назначить имя жесткой вставке;
- в соответствующие поля ввода ввести данные и нажать кнопку **ОК** в диалоговом окне;
- выбрать на схеме элементы, которым назначаются жесткие вставки, и нажать кнопку **ОК** в инструментальной панели.

Для корректировки характеристик ранее введенных жестких вставок следует:

- активировать рассматриваемую операцию;
- в таблице диалогового окна **Жесткие вставки** выбрать строку с параметрами корректируемых вставок, после чего выбранные параметры попадут в соответствующие поля ввода;
- откорректировать параметры;
- нажать одну из кнопок замены — **Заменить и выйти** или **Заменить и продолжить**. В первом случае после замены характеристик диалоговое окно будет закрыто, а во втором — можно продолжить корректировку других жестких вставок.

Расположенные в верхней части кнопки позволяют произвести фильтрацию ранее введенных данных и оставить в таблице строки, относящиеся к данным только в локальной или только в глобальной системах координат.

Помните, что при отключенном фильтре отображения жестких вставок  , на схеме показан не элемент, а линия, соединяющая узлы. При наличии жестких вставок эта линия может не соответствовать действительному положению элемента в схеме.

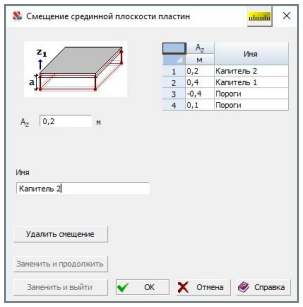
## Смещение срединной плоскости пластин



Эта операция позволяет изменить положение пластинчатых элементов относительно узлов их привязки путем смещения срединной плоскости вдоль местной оси $Z_1$. Величина смещения задается в диалоговом окне (рис. 7.3-3, *а*), которое появляется после активации операции.

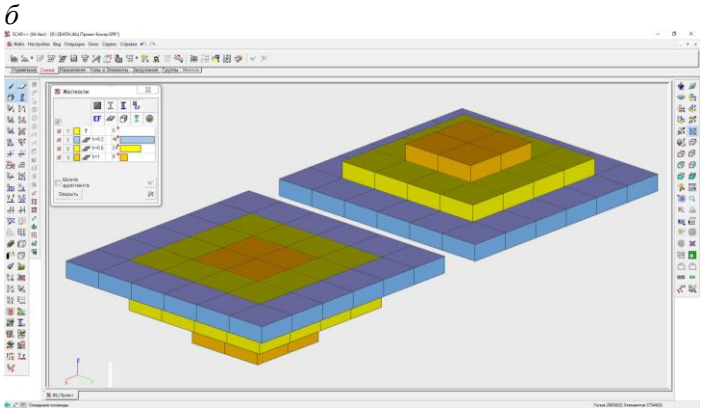
Для выполнения операции после задания величины смещения следует выбрать на схеме смещаемые элементы и нажать кнопку **ОК** в инструментальной панели **Назначение**.

*а*




*Диалоговое окно* **Смещение срединной плоскости пластин**

*б*



Пример использования операции **Смещение срединной плоскости пластин**

Рис. 7.3-3. **Смещение срединной плоскости пластин**

Корректировка ранее заданных значений смещения выполняется путем переноса данных из выбранной строки таблицы в поля ввода с последующей их корректировкой и фиксацией кнопками **Заменить и выйти** или **Заменить и продолжить**. Операция может использоваться, например, для

выравнивания поверхности плиты, представленной конечными элементами разной толщины, по верхней или нижней грани и в других случаях (рис. 7.3-3, *б*).

## Ввод и удаление шарниров и ползунов для стержней



Для стержневых элементов могут быть назначены условия примыкания элемента к узлу расчетной схемы в виде свободы взаимного поворота вокруг осей местной системы координат (цилиндрических шарниров) или свободы взаимных линейных смещений вдоль этих осей (ползуны).

По умолчанию считается, что такие независимые перемещения невозможны в силу имеющихся связей между элементом и узлом.

Назначение условий примыкания выполняется в диалоговом окне **Условия примыкания стержней** (рис. 7.3-4), в котором соответствующими кнопками устанавливаются условия примыкания в каждом из узлов. Это же окно используется и в тех случаях, когда необходимо изменить ранее заданные условия примыкания (но не отменить все).

Для выполнения этой операции следует:

- нажать соответствующую кнопку в инструментальной панели;
- назначить в появившемся диалоговом окне условия примыкания: для полного освобождения степени свободы (идеальный шарнир) следует задать податливость равную 0;
- выбрать места установок шарниров (**возле узла** в местной системе координат $X_1Y_1Z_1$, **возле узла** в общей системе координат XYZ или **у перехода к гибкой части** в системе координат $X_2Y_2Z_2$, представленных на рис. 3.3-12);
- нажать кнопку **ОК** диалогового окна;
- выбрать на схеме нужные элементы;
- нажать кнопку **ОК** в инструментальной панели.

Вариант, при котором в примыкании тонкостенного стержня к узлу отсутствует бимомент, реализуется при помощи установки своеобразных шарниров (маркер **D**).

Для отмены заданных условий примыкания по всем направлениям используется специальная операция **Удаление шарниров**  , активизация которой вызывает одноименное диалоговое окно (рис. 7.3-5). Здесь понятие «шарнир» введено как обобщенное и касается как собственно шарниров, так и ползунов.

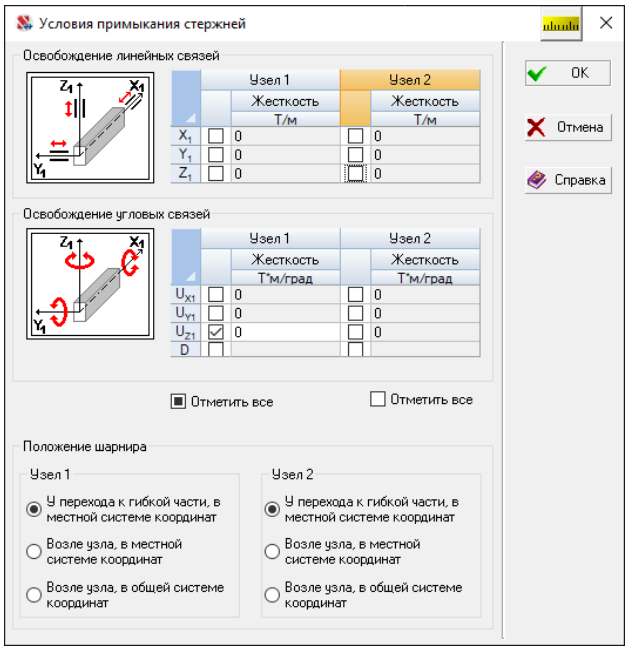



Рис. 7.3-4. *Диалоговое окно* **Условия примыкания стержней**

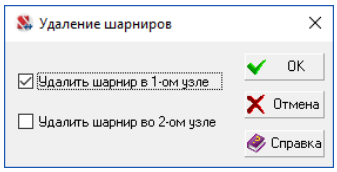



Рис. 7.3-5. *Диалоговое окно* **Удаление шарниров**

В зависимости от активных кнопок удаление будет выполнено в одном или в обоих узлах стержня.

Действия по удалению аналогичны действиям назначения — выбрать элементы и нажать кнопку **ОК** в инструментальной панели.

Для отображения шарниров на схеме используется кнопка фильтров  .

## Ввод и удаление шарниров и ползунов для пластин



Для пластин (так же как и для стержневых элементов) могут быть назначены условия примыкания элемента к узлу расчетной схемы в виде свободы взаимного поворота вокруг осей местной или общей системы координат или свободы взаимных линейных смещений вдоль этих осей (ползуны).

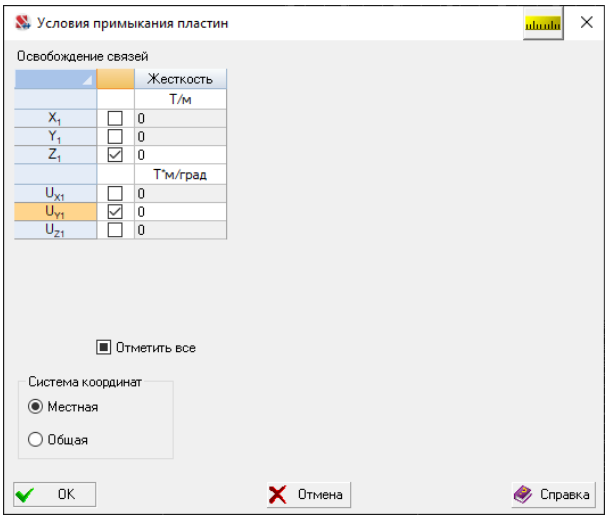



Рис. 7.3-6. *Диалоговое окно* **Условия примыкания пластин**

По умолчанию считается, что такие независимые перемещения невозможны в силу имеющихся связей между элементом и узлом.

Назначение условий примыкания выполняется в диалоговом окне **Условия примыкания пластин** (рис. 7.3-6), в котором соответствующими кнопками устанавливаются условия примыкания в узле. Это же окно используется и в тех случаях, когда необходимо изменить ранее заданные условия примыкания (или отменить все).

Для выполнения этой операции следует:

- нажать соответствующую кнопку в инструментальной панели;
- назначить в появившемся диалоговом окне условия примыкания: для полного освобождения степени свободы (идеальный шарнир) следует задать податливость равную 0;
- выбрать систему координат, в которой действует шарнир (общая или местная);
- нажать кнопку **ОК** диалогового окна;
- выбрать на схеме нужные элементы;
- нажать кнопку **Выбор узлов**  на инструментальной панели **Управление выбором** и выбрать узлы отмеченных элементов, в которых следует установить шарнир;
- нажать кнопку **ОК** в инструментальной панели.

Для отмены заданных условий примыкания по всем направлениям достаточно снять маркеры по всем направлениям и выполнить описанные выше действия.

Для отображения шарниров на схеме используется кнопка фильтров  .

## Назначение угла ориентации осей сечения стержня



Операция используется для:

- изменения ориентации главных или конструктивных осей сечения стержня;
- задания местной системы координат двухузловой упругой связи ненулевой длины.

Подробная информация о местной системе координат стержневых элементов приведена в одноименном разделе главы «Библиотека конечных элементов». Ориентация может быть задана путем указания угла поворота осей, назначением координат точки, относительно которой разворачиваются местные оси $Z_1$ или $Y_1$ выбранных элементов (в зависимости от установленной опции) или смещением относительно первого узла.

Операция позволяет выполнить ориентацию как главных осей инерции, так и конструктивных осей. Управление операцией выполняется с помощью диалогового окна **Ориентация осей инерции** (рис. 7.3-7).

В диалоговом окне следует активировать опцию способа задания углов (по умолчанию — угол поворота осей) и ввести необходимые данные. Все остальные действия уже знакомы — нажать кнопку **ОК** в диалоговом окне, выбрать элементы и подтвердить операцию нажатием кнопки **ОК** в инструментальной панели.

Для того чтобы восстановить значения углов, принятые по умолчанию, необходимо повторить операцию назначения, задав при этом угол 0°.

Корректировка значений углов поворота осей для заданного элемента может быть выполнена в режиме **Местные оси** в окне **Информация об элементе**. Окно вызывается нажатием кнопки  панели фильтров.

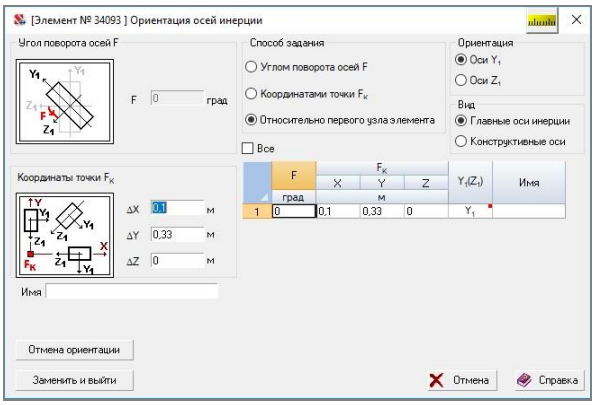



Рис. 7.3-7. *Диалоговое окно* **Ориентация осей инерции**

Для корректировки характеристик ранее введенных углов ориентации следует:

- активировать рассматриваемую операцию;
- в таблице диалогового окна **Ориентация осей инерции** выбрать строку с корректируемыми параметрами, после чего выбранные параметры попадут в соответствующие поля ввода;
- откорректировать параметры;
- нажать одну из кнопок замены — **Заменить и выйти** или **Заменить и продолжить**. В первом случае после замены характеристик диалоговое окно будет закрыто, а во втором — можно продолжить корректировку других углов ориентации.

Для восстановления исходного положения конструктивных осей элементов используется кнопка **Отмена ориентации**. После выхода из диалогового окна по нажатию этой кнопки следует выбрать на схеме элементы, у которых восстанавливается исходное положение осей и нажать кнопку **ОК** в инструментальной панели.

## Назначение промежуточных сечений вычисления усилий



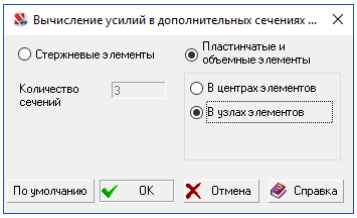



Рис. 7.3-8. *Диалоговое окно* **Вычисление усилий в дополнительных сечениях и узлах**

Эта операция используется для вычисления усилий в промежуточных точках по длине стержня или в узлах пластинчатых и объемных элементов (напомним, что по умолчанию усилия вычисляются только в начале, середине и конце стержня и в центре пластины). Знание усилий в промежуточных сечениях стержней необходимо, например, если предполагается выполнять подбор арматуры.

Управление операцией выполняется в диалоговом окне **Вычисление усилий в дополнительных сечениях и узлах** (рис. 7.3-8).

В окне следует активировать опции, определяющие вид элементов (стержни или пластины), и назначить параметры: для стержней — количество сечений (общее, включая сечения в начале и конце стержня), для пластин и объемных элементов — вид выдаваемой информации.

Все остальные действия традиционны — нажать кнопку **ОК** в диалоговом окне, выбрать элементы, нажать кнопку **ОК** в инструментальной панели.

Для изменения параметров необходимо повторить назначение с новыми данными.

Если в стержневых элементах необходимо назначить количество сечений выдачи усилий, определяемое по умолчанию, т.е. заданное на странице **Элементы** диалогового окна **Параметры расчета** (см. раздел 11.9), то в рассматриваемом окне перед нажатием кнопки **ОК** следует активировать кнопку **По умолчанию**, после чего выбрать нужные элементы и выполнить операцию назначения.

## Изменение направления местной оси $X_1$ стержней на противоположное



С помощью этой операции можно поменять направление местной оси $X_1$ стержня на противоположное, т. е. фактически поменять местами первый и второй узлы элемента.

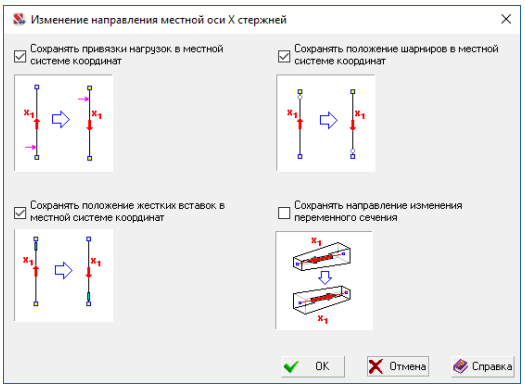



Рис. 7.3-9. *Диалоговое окно* **Изменение направления местной оси X стержней**

Если на стержень действует сосредоточенная нагрузка, то она тоже поменяет положение в соответствии с направлением местной оси, аналогичная проблема может возникнуть с шарнирами и жесткими вставками. Следует помнить, что, если нагрузка на стержень задана в местной системе координат, то она тоже поменяет направление в соответствии с направлением местной оси.

Поэтому при активации данной операции появляется диалоговое окно (рис. 7.3-9), в котором можно задать опции, позволяющие автоматически поменять привязки нагрузок, положение шарниров и жестких вставок. Нажав в диалоге кнопку **OK**, следует отметить на схеме нужные стержневые элементы и нажать кнопку  инструментальной панели.

Для стержней переменного сечения можно выбрать два варианта — сохранить или изменить на противоположное направление изменения переменного сечения.

## Изменение направления местной оси $Z_1$ пластинчатых элементов



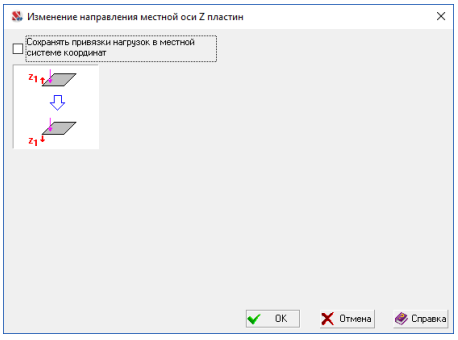



Рис. 7.3-10. *Диалоговое окно* **Изменение направления местной оси Z пластин**

Эта операция позволяет изменить направление местной оси $Z_1$ в пластинчатых элементах на противоположное.

Если на пластину действует сосредоточенная нагрузка, то она тоже поменяет положение в соответствии с направлением местной оси. Следует помнить, что, если нагрузка на пластину задана в местной системе координат, то она тоже поменяет направление в соответствии с направлением местной оси. Поэтому при активации данной операции появляется диалоговое окно (рис. 7.3-10), в котором можно задать опцию, позволяющую автоматически поменять привязки нагрузок. Нажав в диалоге кнопку **OK**, следует отметить на схеме нужные пластинчатые элементы и нажать кнопку  инструментальной панели. Для выбора элементов можно с помощью кнопки фильтров  воспользоваться цветовой или векторной индикацией направления осей.

## Напряжения вдоль заданного направления



Операция  обеспечивает задание направления выдачи усилий и напряжений в пластинчатых элементах, отличного от установленного по умолчанию направления — вдоль осей местной системы координат элемента. Это важно, при анализе результатов вычисления силовых факторов, представленных в виде изолиний и изополей, так как неупорядоченность направлений местных осей элементов при нерегулярных сетках (например, после триангуляции) не позволяет корректно построить изолинии и изополя силовых факторов (они попросту лишаются смысла). Кроме того, при подборе арматуры направления выдачи напряжений рекомендуется согласовать с ориентацией арматурных сеток.

При нажатии кнопки  появляется меню, в котором можно выбрать два варианта: задание направления пользователем или автоматическое назначение (рис. 7.3-11).

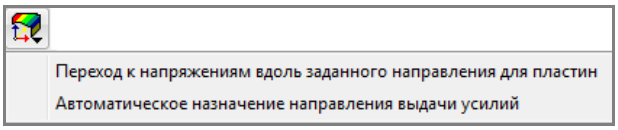



Рис. 7.3-11

В первом случае операция позволяет назначить для пластин:

- A. направление оси $X_N$ вычисления напряжений, которое определяется прямой, проходящей от первого узла элемента к точке, заданной приращениями координат этого узла в общей системе координат. Полученная прямая проецируется на плоскость элемента;
- B. точку, заданную координатами в общей системе координат; проекция на плоскость элемента линии, соединяющей эту точку с первым узлом элемента, определяет ось $X_N$ вычисления напряжений;
- C. направление оси $X_N$ вычисления напряжений, совпадающим с направлением заданного вектора;
- D. направление оси $X_N$ вычисления напряжений явным указанием оси общей системы координат.

При автоматическом назначении для всех горизонтальных пластин устанавливается направление вдоль глобальной оси X, а для всех вертикальных —вдоль глобальной оси Z.

При этом ось $Z_N$ будет совпадать с осью $Z_1$ местной системы координат элемента, а ось $Y_N$ — лежать в плоскости элемента и составлять с осями $X_N$ и $Z_N$ правую тройку.

Оси вычисления напряжений в пластинчатых элементах задаются в диалоговом окне **Задание осей вычисления напряжений** (рис. 7.3-12).

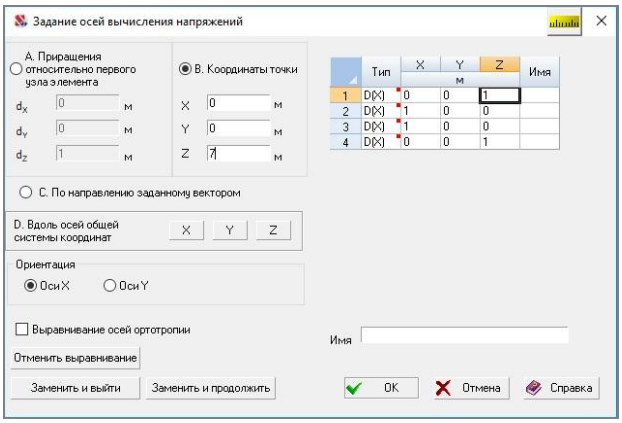



Рис. 7.3-12. *Диалоговое окно* **Задание осей вычисления напряжений**

Для выполнения этой операции следует нажать кнопку вызова операции в инструментальной панели и выбрать в меню способ задания осей. Если выбирается автоматическое назначение, то

операция будет выполнена после выбора в меню этого пункта. В противном случае появится диалоговое окно **Задание осей вычисления напряжений**, в котором с помощью маркеров выбирается правило задания осей выдачи усилий.

В зависимости от выбранного варианта выполняются следующие действия:

- при выборе вариантов A или B задаются приращения или координаты точки соответственно;
- при выборе варианта D активируется кнопка-маркер с наименованием оси общей системы, определяющая направление $X_N$.

После выхода из окна нажатием кнопки **ОК** следует выбрать на схеме нужные элементы и нажать кнопку **ОК** в разделе **Назначения** инструментальной панели.

Если в качестве направления выдачи напряжений выбран вариант C, то операцию рекомендуется выполнять в следующем порядке:

- выйти из диалогового окна нажатием кнопки **ОК**;
- выбрать на схеме элементы, для которых выполняется операция;
- нажать кнопку **ОК** в инструментальной панели, после чего появится окно сообщений (рис. 7.3-13) с предложением выбрать на схеме два узла, определяющие вектор;
- курсором с мишенью указать на схеме два узла (вектор будет направлен от первого узла ко второму);
- вторично нажать кнопку **ОК** в инструментальной панели.

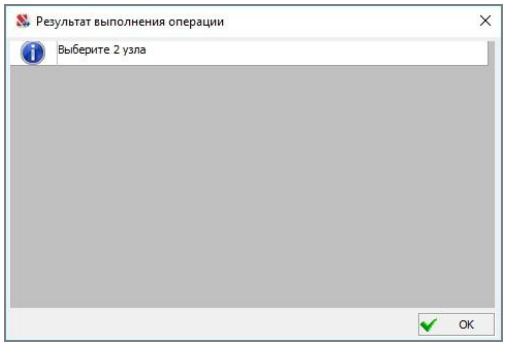



Рис. 7.3-13. *Окно сообщений*

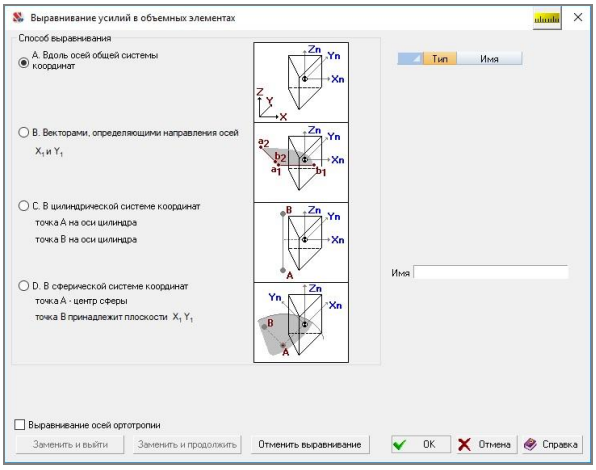



Рис. 7.3-14. *Диалоговое окно* **Выравнивание усилий в объемных элементах**

Для отмены выполненных назначений (направление выдачи усилий будет совпадать с осями местной системы координат элементов) необходимо установить режим задания осей и нажать в диалоговом окне кнопку **Отменить выравнивание**. После выхода из окна выбрать на схеме нужные элементы и нажать кнопку **ОК**.

В диалоговом окне можно также выбрать вариант, при котором назначаться будет направление оси $Y_N$, а не $X_N$: для этого следует в группе **Ориентация** выбрать вариант **Оси Y**.

Аналогичным образом назначается направление выдачи напряжений в объемных элементах —  . Данные при этом задаются в диалоговом окне, показанном на рис. 7.3-14.

Для объёмных элементов в программе предусмотрены следующие варианты задания осей выдачи напряжений:

- вдоль осей общей системы координат;
- вектором, определяющим направление осей выдачи усилий;
- в цилиндрической системе координат;
- в сферической системе координат.

В цилиндрической системе координат указываются координаты двух точек, лежащих на оси цилиндра и задающих направление оси $Z_N$. Ось $X_N$ ортогональна $Z_N$ и проходит через центр тяжести элемента. Ось $Y_N$ ортогональна осям $X_N$ и $Z_N$. В сферической системе координат указываются коор-

динаты центра сферы ($X_1$, $Y_1$, $Z_1$) и дополнительной точки ($X_2$, $Y_2$, $Z_2$). Ось $X_N$ проходит от центра сферы через центр тяжести элемента ($X_3$, $Y_3$, $Z_3$). Ось $Y_N$ лежит в плоскости, определяемой тремя указанными точками, ортогональна $X_N$ и направлена в сторону точки $X_2$, $Y_2$, $Z_2$. Ось $Z_N$ ортогональна $X_N$ и $Y_N$.

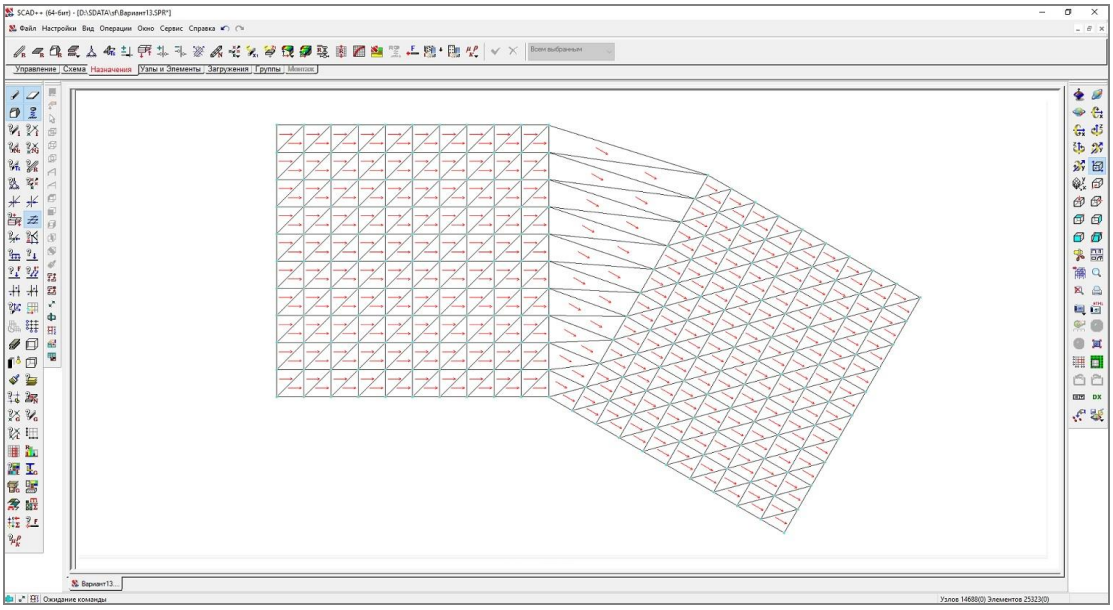


Рис. 7.3-15. *Пример расчетной схемы*

На рис. 7.3-15 приведен пример расчетной схемы, в которой для левой части схемы оси X выдачи усилий заданы вдоль направления оси X общей системы координат, а для правой (развернутой части схемы) задание осей выполнено путем ввода приращений относительно первого узла элемента (1, –0.577, 0), что соответствует углу –30°.

Отображение направления осей вычисления усилий на расчетной схеме включается/отключается нажатием кнопки фильтров  .

Для корректировки ранее назначенных направлений выдачи усилий и напряжений следует:

- активировать рассматриваемую операцию;
- в таблице диалогового окна выбрать строку с корректируемыми параметрами, после чего выбранные параметры попадут в соответствующие поля ввода;
- откорректировать параметры;
- нажать одну из кнопок замены — **Заменить и выйти** или **Заменить и продолжить**. В первом случае после замены характеристик диалоговое окно будет закрыто, а во втором — можно продолжить корректировку.

## Назначение направления осей ортотропии



Эта операция позволяет установить для выбранных элементов направление оси ортотропии $X_1$, по тем же правилам, что и направление осей выдачи усилий и напряжений. Для этого в диалоговых окнах задания осей выдачи усилий и напряжений для пластинчатых и объемных элементов предусмотрен маркер **Выравнивание осей ортотропии**, активация которого указывает на то, что выполненные в диалоговых окнах назначения касаются осей ортотропии.

## Назначение коэффициентов упругого основания



Коэффициенты постели выделены в самостоятельный вид данных и не являются частью описания жесткостных характеристик элементов. Таким образом, элементы, имеющие одинаковые

жесткостные характеристики, могут иметь один тип жесткости, независимо от заданного им коэффициента постели.

Активация данной операции приводит к появлению меню (рис. 7.3-16), в котором следует выбрать тип элементов (стержни или пластины), для которого будет производиться назначение коэффициентов упругого основания.

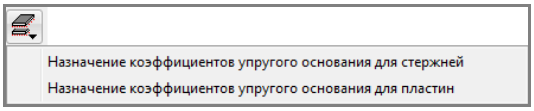



Рис. 7.3-16. *Выбор типов элементов*

Если в расчетной схеме есть, например, только пластины, то меню не выводится, а сразу появляется диалог для ввода данных.

Значения коэффициентов для пластинчатых и стержневых элементов задаются, соответственно, в диалоговых окнах, изображенных на рисунках 7.3-17 и 7.3-18. Операция назначения коэффициентов выбранным элементам схемы выполняется нажатием кнопки **ОК** в инструментальной панели.

Для определения коэффициентов постели $\mathbf{C_1}$ (модель Винклера) под фундаментной плитой можно воспользоваться программой **Кросс**, для связи с которой используется кнопка **Расчет коэффициентов упругого основания** —  в инструментальной панели **Назначение**. С помощью кнопок **Расчет коэффициентов упругого основания** или **Расчет коэффициентов деформативности основания**, установленных на страницах диалоговых окон, могут быть вычислены коэффициенты $\mathbf{C_1}$ и $\mathbf{C_2}$. При вычислении коэффициентов упругого основания используется модель Пастернака, а коэффициентов деформативности основания — модель, приведенная в работе В.Г. Пискунова и Ю.М. Федоренко [1]. Расчеты выполняются как для пластинчатых, так и для стержневых элементов.

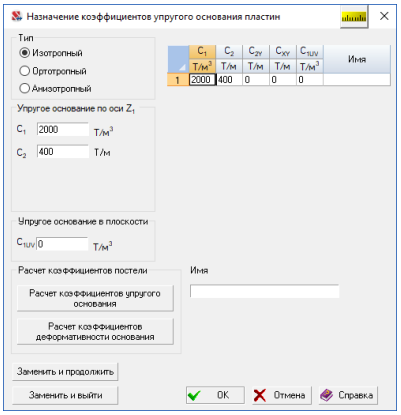



Рис. 7.3-17. *Диалоговое окно* **Назначение коэффициентов упругого основания пластин**

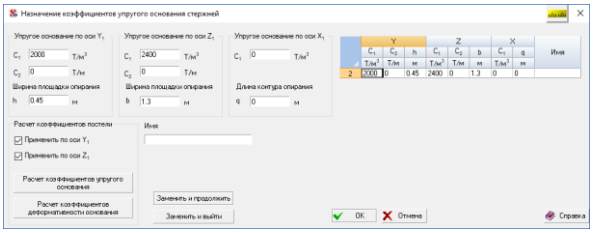



Рис. 7.3-18. *Диалоговое окно* **Назначение коэффициентов упругого основания стержней**

Полученные значения коэффициентов автоматически переносятся в соответствующие поля страницы. При этом для стержневых элементов перенос выполняется в зависимости от установленных опций **Применить по оси ...** (рис. 7.3-18).

Корректировка значений коэффициентов постели выполняется по тем же правилам, что и другие параметры, например, жесткие вставки или углы ориентации осей стержня, т. е. путем переноса данных из выбранной строки таблицы в поля ввода с последующей их корректировкой и фиксацией кнопками **Заменить и выйти** или **Заменить и продолжить**.

Для контроля значений коэффициентов постели в диалоговом окне **Информация об элементе** установлена кнопка **Коэффициенты постели**, после нажатия которой появляется диалоговое окно **Назначение коэффициентов упругого основания** (рис. 7.3-17, 7.3-18). Чтобы в процессоре изменить коэффициент, связанный с конкретным элементом, следует задать его новое значение и выйти из окна нажатием кнопки **ОК**.

## Назначение преднапряжения элементам расчетной схемы



Операция предназначена для назначения локального (внутреннего) преднапряжения стержневым, вантовым, пластинчатым и объемным элементам. Исходные данные для операции задаются в одноименном диалоговом окне (рис. 7.3-19), где необходимо указать с помощью маркеров вид элементов, которым назначается преднапряжение, а также указать, какой набор силовых факторов будет использован для задания. Если маркер **Расширенный режим** не активен, то параметры преднапряжения будут заданы с использованием сокращенного набора силовых факторов. В противном случае будет использован максимальный набор факторов для данного вида элементов. Например, сокращенный набор факторов для стержневых и вантовых элементов включает задание только продольной силы, а расширенный — восемь факторов, в число которых входят продольная сила, крутящий и два изгибающих момента, две поперечные силы и два значения реакций. Значения силовых факторов задаются в таблице, состав граф которой зависит от выбранного вида элементов. Каждый набор параметров преднапряжения может иметь собственное имя, задаваемое в одноименном поле.

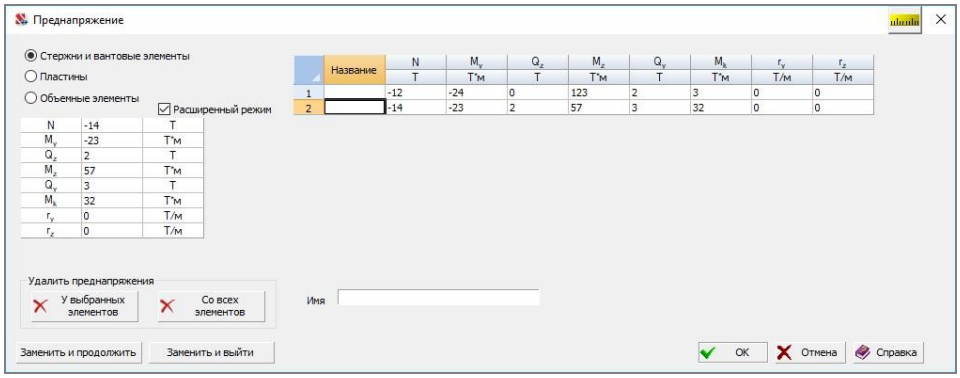



Рис. 7.3-19. *Диалоговое окно* **Преднапряжение**

Для назначения преднапряжения элементам схемы следует задать параметры в диалоговом окне, выйти из окна нажатием кнопки **OK**, выбрать на схеме элементы и нажать кнопку **OK** в инструментальной панели **Назначение**.

Корректировка значений преднапряжения выполняется путем внесения изменений в таблицу с последующей их фиксацией кнопками **Заменить и выйти** или **Заменить и продолжить**.

Для удаления преднапряжения с элементов необходимо в таблице диалогового окна **Преднапряжение** выбрать строку с удаляемыми параметрами и соответствующими кнопками определить правило удаления — **Со всех элементов** или только **У выбранных элементов**, после чего выйти из окна по кнопке **OK**. Если выбрано первое правило, то ранее указанные значения преднапряжения будут удалены со всех элементов, где они были заданы. Во втором случае — значения будут удалены с отмеченных на схеме элементов по нажатию кнопки **OK** в инструментальной панели.

Для контроля значений параметров преднапряжения в диалоговом окне **Информация об элементе** установлена одноименная кнопка. Для отображения на схеме используется кнопка **Преднапряжение** —  на панели фильтров, с помощью которой можно получить как цифровую, так и цветовую индикацию заданных параметров.

## Назначение дополнительных данных для элементов



Данная операция позволяет назначить элементам некоторые достаточно редко используемые свойства. В настоящей версии программы реализовано назначение следующих характеристик:

- предельная неупругая относительная деформация μ по нормам КМК 2.01.03-96, КМК 2.01.03-19 (Узбекистан);
- плотность триангуляции сечения стержня при физически нелинейном расчете;

- число слоев по толщине пластины при физически нелинейном расчете;
- повышающий коэффициент этажности $f_{vk}$ по СП РК 2.03-30-2017 (Казахстан);
- индивидуальный шаг триангуляции элементов Форума.

При нажатии на данную кнопку появляется меню, в котором следует выбрать, какой именно параметр будет назначаться. После этого появится диалоговое окно (рис. 7.3-20), в котором можно задать имя и величину характеристики.

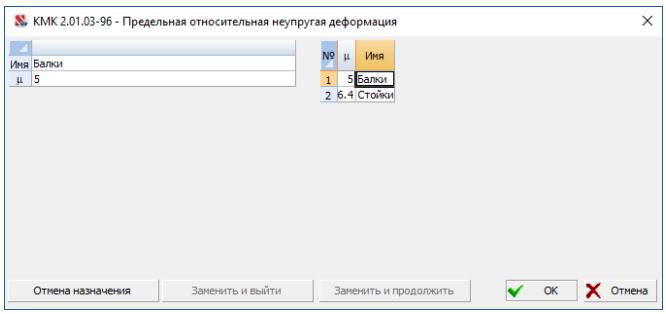



Рис. 7.3-20. *Диалоговое окно назначения дополнительных данных*

Дальнейшие действия идентичны тем, которые описаны при назначении других свойств (жесткостей, коэффициентов постели, ...).

Цветовая шкала дополнительных свойств включается/отключается нажатием кнопки фильтров  .

## 7.4. Задание характеристик узлов

### Назначение связей в узлах



Связи в узлах расчетной схемы назначаются в диалоговом окне (рис. 7.4-1), которое вызывается нажатием соответствующей кнопки в разделе **Назначения** инструментальной панели.

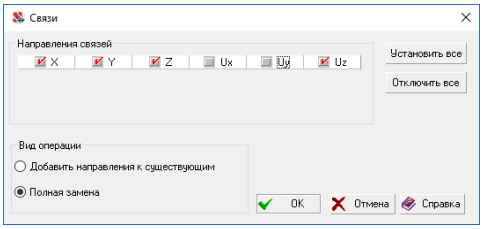



Рис. 7.4-1. *Диалоговое окно* **Связи**

Для назначения связей в узле следует выбрать с помощью маркеров направления степеней свободы, по которым накладываются связи, нажать кнопку **ОК** в диалоговом окне, выбрать на схеме узлы и выполнить операцию нажатием кнопки **ОК** в разделе **Назначения**.

В зависимости от установленного в окне вида операции, связи в узлах будут полностью заменены (удалены, если отключены все маркеры направлений) или добавлены к ранее назначенным.

Для расчетных схем типа 8, 9 и 11 диалоговое окно задания связей имеет измененный вид в соответствии с количеством степеней свободы в узлах соответствующего типа схемы (12 степеней для типа 8, 9 и две степени для типа 11). На рис. 7.4-2 показано окно **Связи** для схем типов 8 и 9, а на рисунке 7.4-3 — для схемы типа 11.

Для отображения связей на схеме можно воспользоваться кнопкой фильтров  .

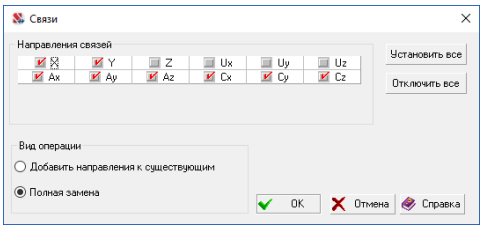



Рис. 7.4-2. *Диалоговое окно* **Связи** для конструкции из многослойных оболочек

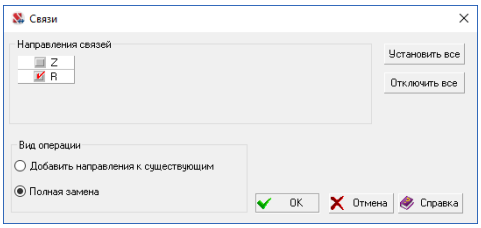



Рис. 7.4-3. *Диалоговое окно* **Связи** для осесимметричной задачи

## Объединение перемещений



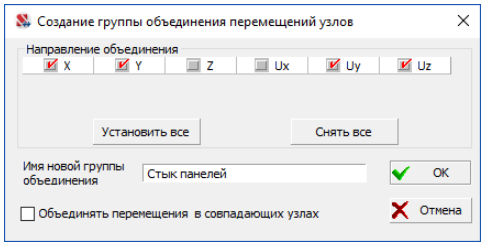



Рис. 7.4-4. *Диалоговое окно* **Создание группы объединения перемещений**

Если ни одна группа объединения перемещений еще не создана, то нажатие кнопки  приведет к появлению диалогового окна **Создание группы объединения перемещений** (рис. 7.4-4).

В нем задаются направления степеней свободы, по которым объединяются перемещения группы, и вводятся имена групп.

Для выполнения операции следует установить с помощью соответствующих маркеров направления степеней свободы, по которым объединяются перемещения, задать имя группы (желательно, чтобы группы имели уникальные имена), подтвердить заданные установки нажатием кнопки **ОК** диалогового окна, выбрать на схеме узлы, которые входят в группу, и выполнить операцию, нажав кнопку **ОК** в инструментальной панели. При активном маркере **Объединять перемещения в совпадающих узлах** выполняется объединение перемещений по заданным направлениям для всех выбранных (отмеченных) пар узлов.

Если в расчетной схеме уже есть ранее созданные группы объединения перемещений, то при нажатии кнопки  появится меню, в котором можно выбрать одно из следующих действий:

- **Создание группы объединения перемещений** (описанное выше);
- **Управление группами объединения перемещений**.

Во втором случае активируется диалоговое окно (рис. 7.4-5), которое используется для управления атрибутами групп и позволяет выполнить следующие действия:

- переименование групп;
- сортировка групп по заданному признаку;
- удаление группы;
- изменение места выбранной группы в списке групп (кнопки **Вверх**, **Вниз**);
- смена набора степеней свободы.

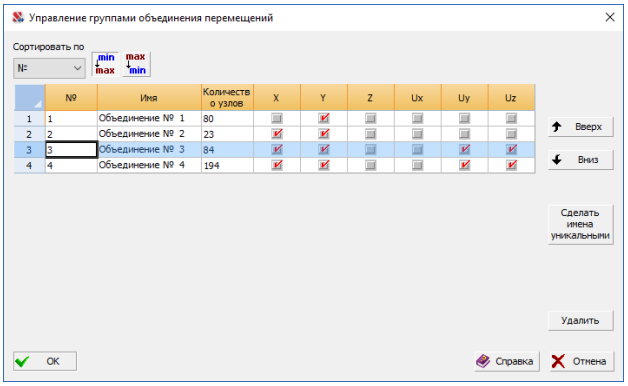



Рис. 7.4-5. *Диалоговое окно*
**Управление группами объединения перемещений**

Графы таблицы групп включают:

- текущий номер группы;
- **№** — номер группы в порядке создания;
- **Имя** — имя конструктивной группы;
- **Количество узлов** в группе;
- перечень **степеней свободы**.

Для переименования группы следует установить курсор на имя нужной группы и дважды нажать левую кнопку мыши. Строка становится доступной для редактирования.

Характеристика группы, относительно которой выполняется сортировка, выбирается из списка **Сортировать по**. Предусмотрены следующие виды сортировок:

- по номеру (в очередности создания группы — при нажатой кнопке **Min/Max**; и наоборот — при нажатой кнопке **Max/Min**);
- по имени группы (в алфавитном порядке при нажатой кнопке **Min/Max** и наоборот — при нажатой кнопке **Max/Min**);
- по количеству узлов в группе (по возрастанию количества в списке групп при нажатой кнопке **Min/Max** и наоборот — при нажатой кнопке **Max/Min**).

Для изменения положения в списке одной или нескольких групп необходимо отметить эти группы и переместить их по списку на нужное количество позиций нажатием на кнопки **Вверх** и **Вниз**.

Если при вводе данных пользователь создал несколько групп с одинаковыми именами, то операция **Сделать имена уникальными** позволяет автоматически переименовать (добавляя к имени суффикс № XXX) группы и получить неповторяющиеся имена.

Удаление выбранных в списке групп объединения перемещений выполняется при помощи одноименной кнопки.

Все назначения, сделанные в диалоговом окне, будут зафиксированы и выполнены после выхода из окна по кнопке **OK**. При этом положение групп в списке инструментальной панели будут соответствовать их положению в списке диалогового окна.

Для отображения групп на схеме можно воспользоваться кнопкой фильтров  .

## Условия примыкания стержней



При наличии в расчетной схеме тонкостенных стержней и выставленной в параметрах расчета опции учета депланаций можно задать в узлах различные условия стыковки таких стержневых элементов к узлу расчетной схемы.

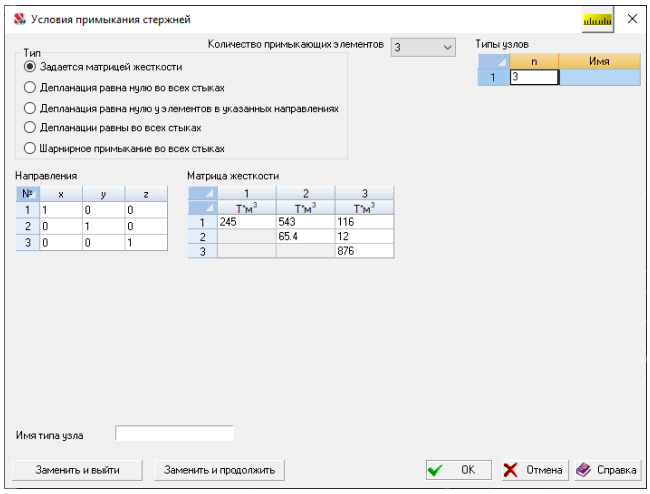



Рис. 7.4-6. *Диалоговое окно* **Условия примыкания стержней**

Предусмотрены следующие ***варианты***:

- узел рассматривается как упругое тело и информация задается его матрицей;
- депланации всех примыкающих к узлу стержневых тонкостенных элементов равны нулю (абсолютно жесткий узел);
- депланации примыкающих к узлу стержневых тонкостенных элементов, имеющих указанные направления, равны нулю (жесткое примыкание части стержней; обратный случай реализуется с помощью задания соответствующих шарниров);
- депланации всех примыкающих к узлу стержневых тонкостенных элементов равны между собой;
- шарнирное примыкание во всех стыках (депланация в узле элемента не связана с депланациями других примыкающих к узлу элементов).

Если для узла не указан ни один из приведенных способов примыкания или не найдено направление элемента в заданном для узла списке направлений, то депланация в данном узле элемента не связана с депланациями других примыкающих к узлу элементов (шарнирное примыкание).



Поскольку последний вариант соответствует умолчабельному поведению, использование его просто приводит к удалению данных о примыкании у выбранных узлов.

В первом случае следует из выпадающего списка выбрать число примыкающих к узлу стержней, в таблице **Направления** указать вектора направлений местных осей $X_1$ стержней и задать матрицу жесткости. Правила создания таких матриц описаны в главе 2.

Направления учитываемых примыкающих к узлу стержневых тонкостенных элементов задаются векторами направлений от рассматриваемого узла ко второму узлу элемента. Например, для звезды элементов узла 3 на рис. 7.4-7 соответствующие направления показаны на рис. 7.4-6.

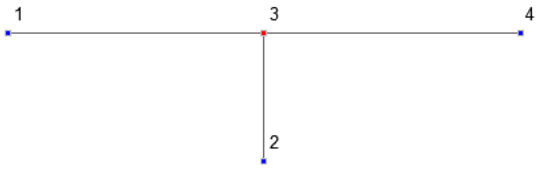



Рис. 7.4-7. Пример задания направлений условий стыковки

Матрица жесткости задается в соответствии с порядком задания векторов направлений и поэтому не зависит от нумерации элементов, примыкающих к конкретному узлу. Учет элементов матрицы жесткости производится только для примыкающих к конкретному узлу элементам, направления которых заданы. Т.е. реальный узел может иметь как меньше, так и больше заданного числа примыкающих элементов.

Во втором случае из выпадающего списка следует задать только число примыкающих к узлу стержней.

При задании нулевых депланаций для стержней с указанными направлениями следует выбрать направления жесткого примыкания аналогично первому случаю.

После нажатия кнопки **ОК** нужно выбрать с помощью мыши нужные узлы расчетной схемы.

Работа с таблицей **Типы узлов** (ранее созданных), кнопками **Заменить и выйти** и **Заменить и продолжить** аналогичны тем, которые реализованы в других операциях (например, задания жесткостных характеристик).

Для отображения цветовой шкалы типов примыканий стержней можно воспользоваться кнопкой фильтров  .

## 7.5. Назначение коэффициентов постели элементам расчетной схемы с помощью программы Кросс

Вычисление коэффициентов постели под плитой фундамента выполняется программой **Кросс** на основе данных геологических изысканий, представленных в виде характеристик скважин. Исходные данные для расчета включают информацию о площадке строительства, которая содержит габариты площадки, положение скважин и их характеристики, положение и геометрию существующих на площадке зданий и сооружений, а также другие данные, необходимые для вычисления коэффициентов постели [2]. Эта информация должна быть подготовлена заранее в программе **Кросс** и записана в виде файла с расширением **.crs**. При каждом следующем обращении к программе информация может быть использована путем вызова нужного файла.

Для определения коэффициентов постели чаще всего необходимо выполнить несколько итераций, используя для каждой следующей итерации значения давления на грунт под плитой фундамента, полученные на предыдущем шаге. В качестве давления на грунт используется величина $\mathbf{R_z}$ — реакция грунта. До выполнения первого расчета коэффициенты постели (чаще всего одинаковые для всех элементов плиты) назначаются пользователем. Если площадка строительства подготовлена, то для связи с программой **Кросс** следует выполнить следующие действия:

- нажать кнопку **Расчет коэффициентов упругого основания** в инструментальной панели **Назначение**;
- выбрать (отметить) фрагмент расчетной схемы, для которого вычисляются коэффициенты постели (элементы, входящие во фрагмент, должны лежать в одной плоскости и образовывать связную область);
- нажать кнопку  инструментальной панели;
- если текущие результаты расчета включают значения $\mathbf{R_z}$, то появляется диалоговое окно **Выбор загружения** (рис. 7.5-1), в выпадающем списке которого следует выбрать номер загружения или комбинации загружений, определяющей $\mathbf{R_z}$ (или нажать кнопку **Продолжить без учета реакций** для отказа от использования значений реакций);
- в появившемся диалоговом окне **Выбор площадки** (рис. 7.5-2) предусмотрены следующие варианты продолжения работы:
    - загрузка одного или нескольких файлов с расширением **.crs,** содержащих заранее подготовленные данные о площадке строительства. Для этого следует нажать кнопку **Добавить** и выбрать в стандартном окне **Open** (**Открыть**) среды Windows необходимые файлы;
    - удалить ранее загруженные файлы из списка **Файл площадки**, отметив их маркеры и нажав кнопку **Удалить**;
    - активировать маркер в строке с файлом площадки, которую предполагается использовать в расчете, и нажать кнопку **Продолжить с выбранной площадкой**;
    - если в качестве продолжения работы будет выбран вариант **Продолжить без площадки**, то появится окно сообщений с предложением открыть существующую площадку (рис. 7.5-3), и в случае утвердительного ответа выбор площадки выполняется в стандартном окне **Open** (**Открыть**).

После выполнения последнего действия загружается программа **Кросс** с подготовленной ранее площадкой.

Главное преимущество варианта выбора площадки через одноименное окно заключается в том, что после первого расчета программа запоминает положение плиты фундамента на площадке и не требует его повторять на последующих шагах итерационного процесса.

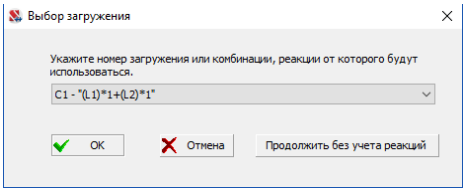



Рис. 7.5-1. *Диалоговое окно* **Выбор загружения**

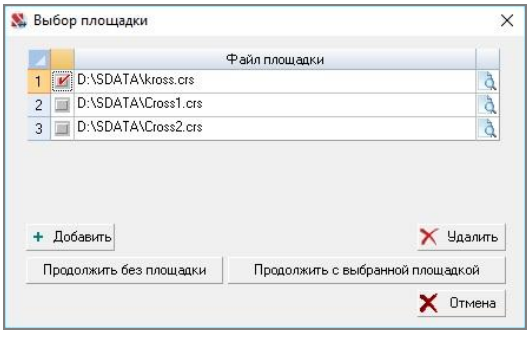



Рис. 7.5-2. *Диалоговое окно* **Выбор площадки**

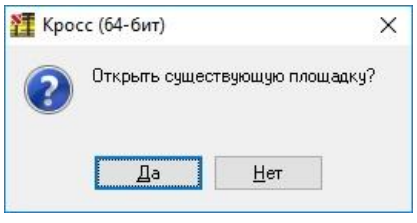



Рис. 7.5-3. *Окно сообщений*

В начальном состоянии фрагмент расчетной схемы (фундаментная плита), для которого определяются коэффициенты постели, размещается в левом нижнем углу площадки (рис. 7.5-4), а его контур, отмеченный курсором в виде пересечения стрелок, может перемещаться вслед за

движением мыши. После перемещения контура в нужное положения следует нажать левую кнопку мыши, в результате чего положение плиты будет зафиксировано в габаритах площадки (рис. 7.5-5).

Следует помнить, что фрагмент расчетной схемы не может располагаться вне габаритов площадки, а также пересекать линии, ограничивающие эти габариты, и контуры других фундаментов (например, существующих зданий), ранее размещенных на площадке. При размещении плиты в габаритах площадки достаточно выдерживать точность позиционирования, измеряемую несколькими метрами, что практически не влияет на результаты расчета.

Если существующий и рассчитываемый фундаменты находятся достаточно близко, то точность позиционирования должна быть выше.

При первом расчете давление на грунт (нагрузка) и отметка подошвы задаются пользователем по правилам, описанным в руководстве к программе **Кросс**. После получения значения $\mathbf{R_z}$ на каждом следующем шаге итерации задается только отметка подошвы (дополнительная нагрузка может задаваться, если это необходимо).

В качестве сравнительной оценки полученного на текущем шаге решения с решением на предыдущем шаге можно рассматривать вертикальные перемещения узлов плиты. Решение о прекращении итерационного процесса и принятии полученных коэффициентов постели в качестве расчетных принимает пользователь в зависимости от характера решаемой задачи.

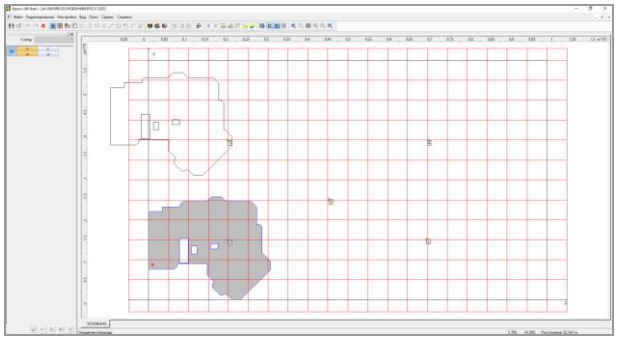


Рис. 7.5-4. *Начальное положение фундаментной плиты после ее загрузки в программу* **Кросс**

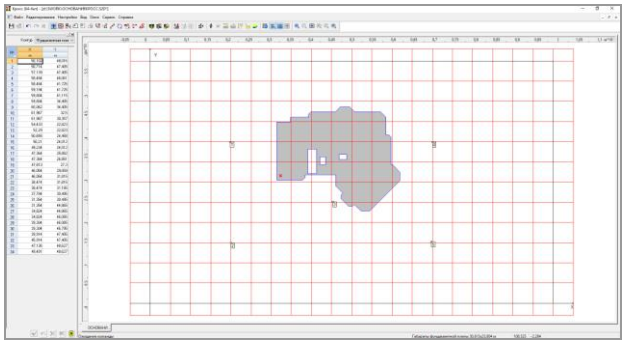


Рис. 7.5-5. *Окончательное положение фундаментной плиты после фиксации*

После выполнения расчета в программе **Кросс** правила назначения коэффициентов постели каждому конечному элементу определяются по правилам, которые пользователь установит в диалоговом окне (рис. 7.5-6)

В этом диалоговом окне с помощью маркеров устанавливаются правила назначения коэффициентов постели элементам расчетной схемы. Предусмотрено два варианта назначения:

- назначение каждому конечному элементу, входящему в рассматриваемый фрагмент, «индивидуального» значения коэффициента постели (на основании значения, которое программа **Кросс** вычислила в центре элемента);
- назначение заданного количества интервалов значений коэффициентов по установленным правилам (используемое значение может быть принято как минимальное, максимальное или среднее значение границ интервала).

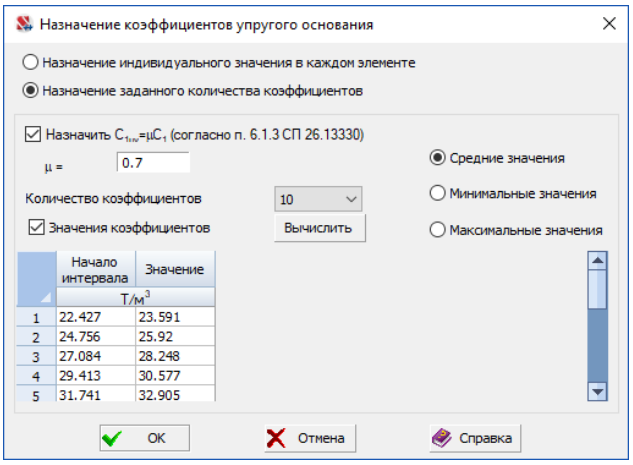



Рис. 7.5-6. *Диалоговое окно*
**Назначение коэффициентов упругого основания**

Наконец, пользователь может сам задать значения границ интервалов, которые должна использовать программа. Для этого нужно активировать маркер **Значения коэффициентов**, после чего в таблице ввести необходимые значения коэффициентов.

Специальный маркер позволяет использовать режим, при котором одновременно с назначением коэффициента $C_1$ элементам будут назначены коэффициенты $C_{1uv}$ упругого основания в плоскости, равные $\mu C_1$. По умолчанию $\mu$=0.7 (в соответствии с рекомендациями п. 6.1.3 СП 26.13330), но эта величина может быть изменена пользователем.

## 7.6. Литература к главе Задание Характеристик Узлов и Элементов

1. Пискунов В.Г., Федоренко Ю.М. Динамический метод контроля состояния слоистых плит на упругом основании. – Архитектура и строительство Беларуси, №5-6, 1994, с.19-22.
2. SCAD Office. Реализация СНиП в проектирующих программах. / Карпиловский В.С., Криксунов Э.З., Маляренко А.А., Микитаренко М.А., Перельмутер А.В., Перельмутер М.А., Федоровский В.Г., Юрченко В.В. — М.: СКАД СОФТ, 2014 — 480с.
3. Zheng Ye., Berdichevsky V.L., Wenbin Yu. An equivalent classical plate model of corrugated structures // International Journal of Solids and Structures. 2014. Vol. 51 — P. 2073-2083.

# 8. Задание схем загружений

В этой главе рассматриваются операции задания нагрузок и формирования схем загружений для выполнения статического и динамического расчетов. Управление операциями сосредоточено в разделе **Загружения** инструментальной панели (рис. 8-1).

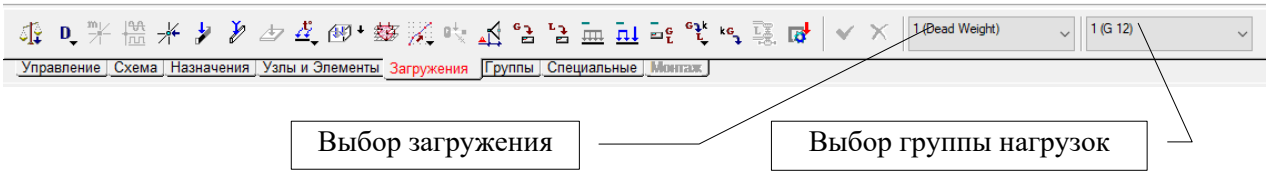



Рис. 8-1. *Раздел* **Загружения** *инструментальной панели*

Нагрузки, действующие на рассчитываемую конструкцию, задаются в виде узловых сил и моментов, а также сосредоточенных, трапециевидных и распределенных сил и моментов на элементы.

Загружения могут включать в себя набор нагрузок любого вида и характеризуются номером и именем. Если какие-то наборы нагрузок встречаются в нескольких загружениях, то в процессе формирования загружений могут быть созданы **Группы нагрузок**, включающие эти наборы. Группы сохраняются под указанными именами и могут добавляться в любые загружения.

В раздел **Загружения** включены следующие операции:

- — автоматическое задание собственного веса;
- — параметры динамических загружений;
- — инерционные характеристики;
- — параметры динамических воздействий;
- — характеристики узловых нагрузок;
- — характеристики нагрузок на стержневые элементы;
- — дислокации;
- — характеристики нагрузок на пластинчатые элементы;
- — характеристики температурных нагрузок;
- — характеристики нагрузок на объемные элементы;
- — характеристики нагрузок на области;
- — маршруты движения;
- — характеристики воздействий вида «заданные перемещения» через нуль-элемент;
- — характеристики воздействий вида «смещения связей»;
- — запись (сохранение) группы нагрузок;
- — запись (сохранение) загружения;
- — очистка схемы от нагрузок;
- — удаление нагрузок;
- — удаление загружений и групп нагрузок;
- — сборка загружений из групп нагрузок;
- — назначение коэффициентов группам нагрузок;
- — упаковка (исключение «пустых») загружений;
- — корректировка параметров (имен) загружений/групп нагрузок.

## 8.1. Задание статических загружений

При задании статических загружений рекомендуется следующий порядок действий:

- с помощью кнопок инструментальной панели выбрать вид нагрузки (узловые или на элементы);
- в диалоговом окне с параметрами нагрузки задать вид, направление и величину нагрузки;
- выбрать узлы или элементы, к которым привязывается заданная нагрузка;
- нажать кнопку **ОК** в разделе **Загружения** инструментальной панели или клавишу **Enter** на клавиатуре;
- повторить описанные операции для других нагрузок, входящих в текущее загружение;
- после назначения всех нагрузок текущего загружения нажать кнопку **Сохранить/Добавить загружение**;
- в диалоговом окне **Сохранение загружения** ввести имя загружения, задать его характеристики и нажать кнопку **ОК**;
- перед вводом нового (следующего) загружения нажать кнопку **Снять все нагрузки** на инструментальной панели.

Операция **Сохранить/Добавить загружение** —  обязательно должна завершать задание нагрузок текущего загружения. В противном случае введенные нагрузки не будут учтены при расчете. Характеристики загружений, заданные в диалоговом окне **Сохранение загружения**, автоматически учитываются при формировании расчетных сочетаний усилий (РСУ). Рекомендуется давать загружениям уникальные имена, характеризующие назначение нагрузок.

Операция **Снять все нагрузки** выполняет очистку временной (буферной) памяти, в которой накапливаются нагрузки текущего загружения, и позволяет подготовить ввод нового загружения. Очевидно, что эта операция должна выполняться после сохранения загружения.

Правила работы с группами нагрузок и корректировка загружений описаны ниже.

## Автоматическое задание собственного веса



Операция выполняется для стержней, пластин и объемных элементов — и только в том случае, если в жесткостных характеристиках элементов задан объемный вес материала. Собственный вес элементов на единицу длины/площади вычисляется как произведение площади поперечного сечения стержней или толщины пластины на объемный вес материала. Для стержней при использовании численного или численно-параметрического описания жесткостей **SCAD** работает по следующему алгоритму — из численного описания берется величина EF, делится на модуль Юнга E (получаем аналог площади сечения) и умножается на удельный вес материала.

После активации операции появляется диалоговое окно **Собственный вес**, в котором задается коэффициент включения собственного веса, а также правила назначения нагрузок:

- назначать нагрузки всем элементам или только отмеченным на схеме, что позволяет задавать разные коэффициенты разным группам элементов;
- включать или не включать жесткие вставки в длину элемента, т. е. учитывать «вес» жестких вставок;
- заменять коэффициент включения собственного веса при повторной активации операции или суммировать новое значение коэффициента с предыдущим.

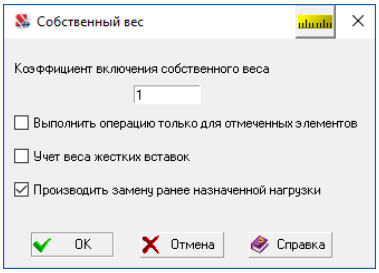



Рис. 8.1-1. *Диалоговое окно* **Собственный вес**

Если в процессе выполнения операции обнаружены элементы, которым не может быть назначена нагрузка собственного веса, появляется окно сообщений с перечнем таких элементов.

Одновременно сообщение дублируется в список выполненных операций в нижней части окна, где предусмотрены операции выбора указанных элементов.

Нагрузки от собственного веса моделируются в виде распределенных сил, действующих на элементы по направлению оси Z общей системы координат. Для отображения распределенных нагрузок на схеме используется кнопка фильтров  . При нажатой кнопке фильтров  рядом с изображением выводится и значение интенсивности нагрузки.

## Узловые нагрузки



Узловые нагрузки задаются в диалоговом окне **Ввод узловых нагрузок**, которое появляется после нажатия соответствующей кнопки в разделе **Загружения** инструментальной панели.

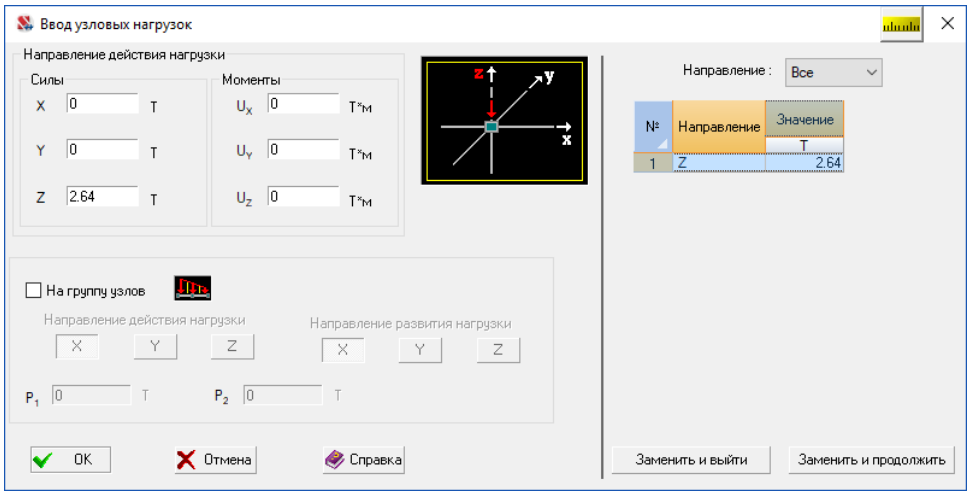



Рис. 8.1-2. *Диалоговое окно* **Ввод узловых нагрузок**

Если на узлы в рамках одного загружения действуют нагрузки по разным направлениям, то такой набор нагрузок может быть задан сразу. При этом пиктограмма, отображающая положительное направление соответствующей нагрузки, будет показывать направление нагрузки, в поле ввода которой находится курсор. Рекомендуется следующий порядок ввода узловых нагрузок:

- активировать операцию **Узловые нагрузки**;
- в одноименном диалоговом окне задать значения нагрузок, которые одновременно действуют на один узел;
- выйти из диалогового окна нажатием кнопки **OK**;
- выбрать на схеме узлы, на которые действует заданный набор нагрузок;
- нажать кнопку **OK** в инструментальной панели или клавишу **Enter** на клавиатуре.

В таблице диалогового окна **Ввод узловых нагрузок** отображаются характеристики всех ранее заданных в текущем загружении узловых нагрузок. Эти данные могут использоваться для ввода новых нагрузок или корректировки ранее введенных. Для селекции нагрузок по направлению действия используется список **Направление** (по умолчанию отображаются все нагрузки).

Если при выборе узлов одиночным курсором в мишень попадает несколько узлов, то их список выводится в диалоговом окне **Узлы в мишени курсора** (рис. 8.1-3). Узел, выбранный в списке этого окна, отмечается на схеме красным цветом, а его координаты выводятся в соответствующих полях диалогового окна. Нужный узел фиксируется кнопкой **Выбрать**, после чего окно закрывается и этот узел может быть использован для назначения нагрузки.

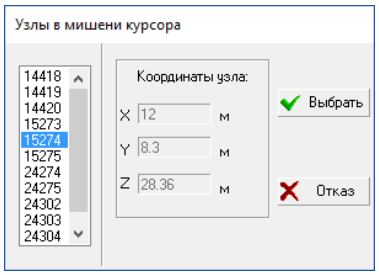



Рис. 8.1-3. *Диалоговое окно* **Узлы в мишени курсора**

### *Корректировка ранее введенных нагрузок*

Для корректировки ранее введенных нагрузок выполняются следующие действия:

- из списка инструментальной панели режима **Загружения**, выбрать загружение, в котором корректируются узловые нагрузки;
- активировать операцию **Узловые нагрузки**;
- в таблице со списком введенных нагрузок диалогового окна **Ввод узловых нагрузок** отметить строку с корректируемой нагрузкой, после чего характеристики нагрузки (направление и значение) попадают в соответствующее поле ввода;
- изменить характеристики нагрузки;
- нажать кнопку **Заменить и выйти** (окно закрывается), если меняется только эта нагрузка, или **Заменить и продолжить**, если будут меняться и другие узловые нагрузки в текущем загружении.

Существует еще одна возможность откорректировать/удалить узловые нагрузки, реализованная в режиме получения информации об узле (кнопка фильтров  ).

После корректировки всех нагрузок необходимо сохранить загружение.

### *Использование характеристик ранее введенной нагрузки при вводе нагрузок*

Если при вводе очередной нагрузки окажется, что такая нагрузка (вид, величина, направление, …) уже использовалась в текущем загружении, то для ее повторного применения следует:

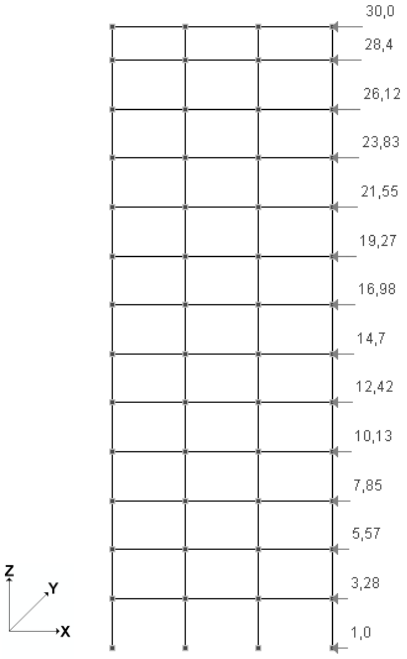
- активировать операцию **Узловые нагрузки**;
- в таблице со списком введенных нагрузок диалогового окна **Ввод узловых нагрузок** отметить строку с характеристиками нужной нагрузки (характеристики нагрузки попадают в соответствующее поле ввода);
- нажать кнопку **OK** (окно закрывается) и назначить выбранную нагрузку на узлы модели.

После назначения всех нагрузок необходимо сохранить загружение.

## Задание нагрузок на группу узлов

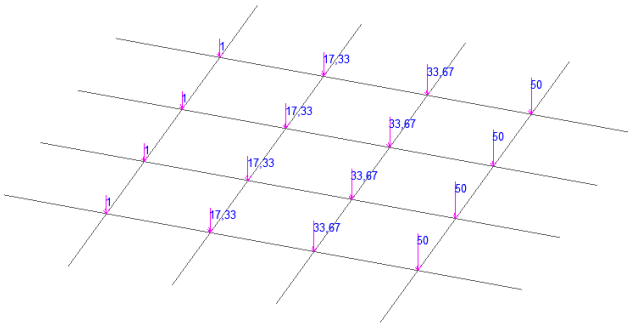
При назначении узловых нагрузок предусмотрена возможность задания нагрузок гидростатического типа на группу выбранных узлов. Закон их изменения по пространственной координате, соответствующей «глубине водоема», является линейным. «Глубина водоема» может быть задана в любом направлении.

При вводе таких нагрузок их величина будет изменяться по линейному закону от заданного начального значения до конечного в зависимости от координаты узла, к которому прикладывается нагрузка, в направлении развития (направление возрастания «глубины» назначается пользователем).




**Пример 1**

Направление развития нагрузки Z, направление нагрузки X, диапазон изменения величины нагрузки $P_1 = 1$, $P_2 = 30$.




**Пример 2**

Направление развития нагрузки X, направление нагрузки Z, диапазон изменения нагрузки $P_1 = 1$, $P_2 = 50$.

Для ввода нагрузок на группу узлов необходимо выполнить следующие действия:

- активировать операцию **Узловые нагрузки**;
- в появившемся диалоговом окне **Ввод узловых нагрузок** активировать маркер **На группу узлов**;
- выбрать направление действия нагрузки (операция выполняется только по направлениям вдоль осей общей системы координат);
- выбрать направление развития нагрузки;
- ввести начальное ($P_1$) и конечное ($P_2$) значения величины нагрузки и нажать кнопку **ОК** в диалоговом окне (начальное значение нагрузки $P_1$ будет присвоено узлу (узлам) с минимальным значением координаты в направлении развития);
- выбрать на расчетной схеме узлы и выполнить назначение, нажав кнопку **ОК** в разделе **Загружения** инструментальной панели или клавишу **Enter** на клавиатуре.

## Нагрузки на стержневые элементы



Вид, направление и величина нагрузок на стержневые элементы назначаются в диалоговом окне **Задание нагрузок на стержневые элементы** (рис. 8.1-4), которое появляется после нажатия соответствующей кнопки в инструментальной панели раздела **Загружения**.

В программе предусмотрены следующие виды нагрузок:

- сосредоточенная нагрузка;
- распределенная нагрузка на часть элемента;
- равномерно распределенная нагрузка на весь элемент;
- собственный вес.

Все виды нагрузок могут быть заданы как в общей, так и в локальной системе координат элемента. Кроме того, на группу элементов может быть задана нагрузка «гидростатического» типа.

Рекомендуется следующий порядок ввода нагрузок на стержни:

- активировать операцию **Нагрузки на стержни**;
- в диалоговом окне **Задание нагрузок на стержневые элементы** назначить систему координат, вид, направление, величину и, если это необходимо, — привязку нагрузки (после

выбора вида нагрузки в окне демонстрируется пиктограмма, показывающая положительное направление ее действия);
- выйти из диалогового окна нажатием кнопки **OK**;
- выбрать на схеме элементы, на которые действует заданная нагрузка;
- нажать кнопку **OK** в инструментальной панели или клавишу **Enter** на клавиатуре.

Маркер **Обязательно учитывать нагрузку на жесткие вставки** позволяет задать специальный вид нагрузки, на которую не распространяется действие параметра расчета **Не учитывать равномерно-распределенные нагрузки на жестких вставках стержневых элементов**.

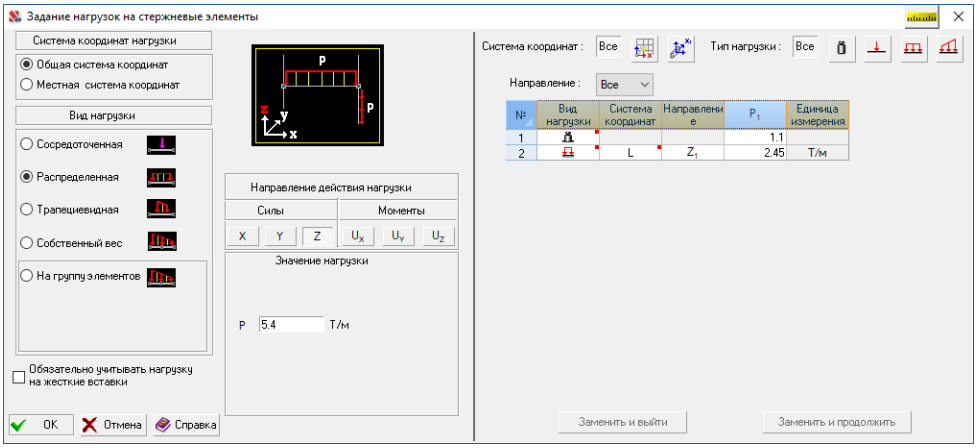



Рис. 8.1-4. *Диалоговое окно* **Задание нагрузок на стержневые элементы**

В таблице диалогового окна отображаются характеристики всех, ранее заданных в текущем загружении, нагрузок на стержни. Эти данные могут использоваться для ввода новых нагрузок или корректировки ранее введенных. Для селекции нагрузок по виду, направлению действия и системе координат используется набор кнопок-маркеров с изображением вида нагрузки, а также выпадающий список **Направление** (по умолчанию отображаются все нагрузки по всем направлениям, включая нагрузки собственного веса).

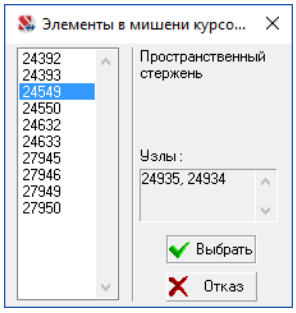



Рис. 8.1-5. *Диалоговое окно* **Элементы в мишени курсора**

Если при выборе элементов одиночным курсором в мишень попадает несколько стержней, то их список выводится в диалоговом окне **Элементы в мишени курсора** (рис. 8.1-5). Стержень, выбранный в списке этого окна, отмечается на схеме красным цветом. Нужный элемент фиксируется кнопкой **Выбрать**, после чего окно закрывается и этот элемент может быть использован для назначения нагрузки.

При вводе сосредоточенных и трапециевидных нагрузок выполняется контроль привязки нагрузок по длине элемента и в случае, если нагрузка не попадает на элемент, выдается сообщение со списком элементов, которым не назначена нагрузка. Одновременно это сообщение дублируется в список выполненных операций в нижней части окна.

### *Корректировка ранее введенных нагрузок*

Для корректировки ранее введенных нагрузок выполняются следующие действия:
- из списка инструментальной панели режима **Загружения**, выбрать загружение, в котором корректируются нагрузки на стержни;
- активировать операцию **Нагрузки на стержни**;

- в таблице со списком введенных нагрузок диалогового окна **Задание нагрузок на стержневые элементы** отметить строку с корректируемой нагрузкой, после чего характеристики нагрузки (вид, направление, значение, привязка) попадают в соответствующие поля ввода;
- изменить характеристики нагрузки;
- нажать кнопку **Заменить и выйти**, если меняются характеристики только одной нагрузки (внесенные изменения будут выполнены после выхода из диалогового окна), или **Заменить и продолжить**, если в текущем загружении таких нагрузок несколько (в этом случае изменения будут отражаться в таблице после нажатия указанной кнопки).

Режим корректировки не используется для ввода новых нагрузок, т.к. характеристики нагрузки меняются «по месту» и не запоминаются. После завершения работы с текущим загружением его необходимо сохранить.

#### *Использование характеристик ранее введенной нагрузки при вводе нагрузок*

Если при вводе очередной нагрузки окажется, что такая нагрузка (вид, величина, направление, …) уже использовалась в текущем загружении, то для ее повторного применения следует:

- активировать операцию **Нагрузки на стержни**;
- в таблице со списком введенных нагрузок диалогового окна **Задание нагрузок на стержневые элементы** отметить строку с характеристиками нужной нагрузки (характеристики нагрузки попадают в соответствующие поля ввода);
- нажать кнопку **ОК** (окно закрывается);
- назначить выбранную нагрузку на элементы.

После ввода и корректировки всех нагрузок загружение необходимо сохранить.

### Задание нагрузок на группу элементов

При назначении нагрузок на стержни предусмотрена возможность задания нагрузок гидростатического типа на группу элементов. Закон их изменения по пространственной координате, соответствующей «глубине водоема», является линейным. «Глубина водоема» может быть задана в любом направлении.

При вводе такие нагрузки (в виде трапециевидных нагрузок по длине элемента) будут изменяться по линейному закону от заданного начального значения до конечного в направлении развития (направление возрастания «глубины» назначается пользователем).

Для ввода нагрузок на группу элементов необходимо выполнить следующие действия:

- активировать операцию **Нагрузки на стержни**;
- в появившемся диалоговом окне **Задание нагрузок на стержневые элементы** активировать маркер **На группу элементов**;
- выбрать направление действия нагрузки;
- выбрать направление развития нагрузки;
- ввести начальное ($P_1$) и конечное ($P_2$) значения величины нагрузки и нажать кнопку **ОК** в диалоговом окне (начальное значение нагрузки $P_1$ будет привязано к узлу/узлам элементов с минимальным значением координаты в направлении развития);
- выбрать на расчетной схеме элементы и выполнить назначение, нажав кнопку **ОК** в разделе **Загружения** инструментальной панели или клавишу **Enter** на клавиатуре.

### Дислокации

Воздействия деформационного типа на стержневые элементы, подобно силовым воздействиям, могут быть распределенными (например, температурный нагрев) или сосредоточенными, называемыми дислокациями. Дислокационные воздействия реализуются специальными устройствами, например, винтовыми стяжками, когда с их помощью создается преднапряженное состояние конструкции, или задаются принужденными смещениями, для исправления несовпадения частей стержня, вызванных неточностью изготовления и монтажа. Кроме того, они могут использоваться в качестве приема расчета, например, при кинематическом способе построение линий влияния.

В программе реализованы два вида сосредоточенных деформаций:

- угловые (изломы $\varphi_{y1}, \varphi_{z1}$ и скручивание $\varphi_{x1}$), задаваемые углами поворота относительно местных осей стержня (рис. 8.1-6);
- линейные (сдвиги $\Delta_{y1}, \Delta_{z1}$ и удлинение $\Delta_{x1}$), задаются, как смещение в соответствующем направлении в местной системе координат стержня (рис. 8.1-7).

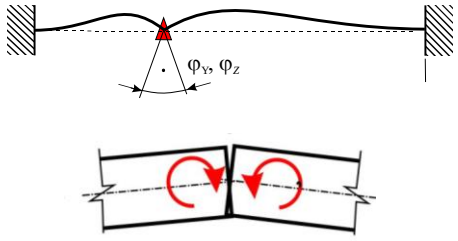



Рис. 8.1-6. Примеры угловых дислокаций

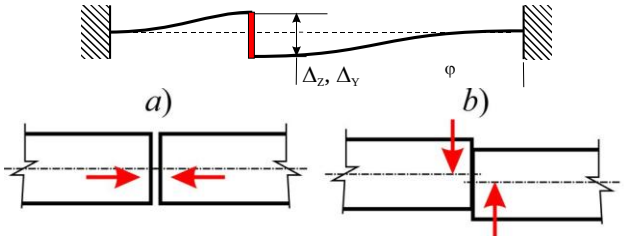



Рис. 8.1-7. Примеры линейных дислокаций

### Задание Дислокации



Направление и величина дислокации задаются в одноименном диалоговом окне (рис. 8.1-8).

Величина сдвига назначается в единицах длины, указанных в диалоговом окне (например, в метрах), аналогично, для излома — в единицах измерения углов. Положительное направление линейных сдвигов совпадает с направлением местных осей элемента, а изломов — по направлению часовой стрелки, если смотреть с конца соответствующей местной оси.

При назначении дислокаций рекомендуется следующий порядок действий:

- нажать кнопку **Дислокации** в разделе **Загружения** инструментальной панели;
- в диалоговом окне **Задание дислокаций** (рис. 8.1-8) активировать маркер, определяющий направление сдвига или угол излома;
- задать значение дислокации и привязку к стержню.
- выйти из диалогового окна, нажав кнопку **ОК**;
- выбрать на схеме стержни, которым назначается заданная дислокация;
- нажать кнопку **ОК** в инструментальной панели или клавишу **Enter** на клавиатуре.

В тех случаях, когда привязка к стержню задается в долях длины гибкой части, следует активировать одноименный маркер и задать значение привязки ($\delta < 1$) относительно первого узла стержня.

Если при назначении дислокаций была нажата кнопка фильтров ***Отображение дислокаций***  , то они будут показаны на схеме.

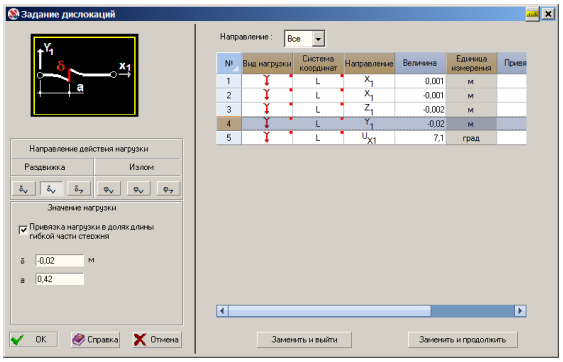



Рис. 8.1-8. *Диалоговое окно* **Задание дислокаций**

### Корректировка ранее введенных нагрузок

Для корректировки ранее введенных нагрузок выполняются следующие действия:

- из списка инструментальной панели режима **Загружения** выбрать загружение, в котором корректируются нагрузки;
- активировать операцию ***Дислокации***;
- в таблице со списком введенных нагрузок диалогового окна **Задание дислокаций** отметить строку с корректируемой нагрузкой, после чего характеристики нагрузки попадают в соответствующие поля ввода;
- изменить характеристики нагрузки (в том числе и вид дислокации, если это необходимо);
- нажать кнопку **Заменить и выйти**, если меняются характеристики только одной нагрузки (внесенные изменения будут выполнены после выхода из диалогового окна), или **Заменить и продолжить**, если в текущем загружении таких нагрузок несколько (в этом случае изменения будут отражаться в таблице после нажатия указанной кнопки).

Существует еще одна возможность откорректировать/удалить нагрузки на элемент, реализованная в режиме получения информации об элементе (кнопка фильтров  ).

После завершения работы с текущим загружением его необходимо сохранить.

### Использование характеристик ранее введенной нагрузки при вводе нагрузок

Если при вводе очередной нагрузки окажется, что такая нагрузка (величина, направление, …) уже использовалась в текущем загружении, то для ее повторного применения следует:

- активировать операцию ***Дислокации***;
- в таблице со списком введенных нагрузок диалогового окна отметить строку с характеристиками нужной нагрузки (характеристики нагрузки попадают в соответствующие поля ввода);
- нажать кнопку **OK** (окно закрывается);
- назначить выбранную нагрузку на стержни.

После ввода и корректировки всех нагрузок загружение необходимо сохранить.

## Нагрузки на пластины



Вид, направление и величина нагрузок на пластинчатые элементы (оболочки, плиты, балки-стенки) назначаются в диалоговом окне **Задание нагрузок на пластинчатые элементы** (рис. 8.1-9), которое появляется после нажатия соответствующей кнопки в инструментальной панели раздела **Загружения**.

В программе предусмотрены следующие виды нагрузок:

- сосредоточенная нагрузка;
- равномерно распределенная нагрузка на элемент;
- равномерно распределенная нагрузка между двумя узлами элемента (нагрузка по линии);
- трапециевидная нагрузка на элемент;
- трапециевидная нагрузка между двумя узлами элемента (нагрузка по линии);
- собственный вес.

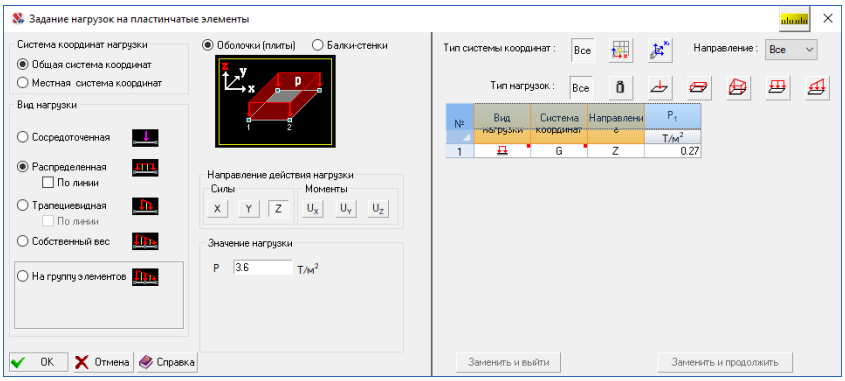



Рис. 8.1-9. *Диалоговое окно* **Задание нагрузок на пластинчатые элементы**

Все виды нагрузок могут быть заданы как в общей, так и в локальной системе координат. Кроме того, нагрузка «гидростатического» типа может быть задана на группу элементов.

Рекомендуется следующий порядок ввода нагрузок на пластины:

- активировать операцию **Нагрузки на пластины**;
- в диалоговом окне **Задание нагрузок на пластинчатые элементы** назначить систему координат, вид, направление, величину и, если это необходимо, — привязку нагрузки (после выбора вида нагрузки в окне демонстрируется пиктограмма, показывающая положительное направление ее действия);
- выйти из диалогового окна нажатием кнопки **OK**;
- выбрать на схеме элементы, на которые действует заданная нагрузка;
- нажать кнопку **OK** в инструментальной панели или клавишу **Enter** на клавиатуре.

В таблице диалогового окна отображаются характеристики всех, ранее заданных в текущем загружении, нагрузок на пластины. Эти данные могут использоваться для ввода новых нагрузок или корректировки ранее введенных. Для селекции нагрузок по виду, направлению действия и системе координат используется набор кнопок-маркеров с изображением вида нагрузки, а также выпадающий список **Направление** (по умолчанию отображаются все нагрузки по всем направлениям, включая нагрузки собственного веса).

В диалоговом окне демонстрируется пиктограмма, показывающая положительное направление действия нагрузки. Так как для балок-стенок принята отличная от плит и оболочек система описания местных осей, то при задании нагрузок на балки-стенки в местной системе координат желательно устанавливать кнопку управления выводом пиктограмм в режим **Балки-стенки**.

Если при выборе элементов курсором с мишенью, в мишень попадает несколько элементов, то их список выводится в диалоговом окне **Элементы в мишени курсора** (рис. 8.1-5). Элемент, выбранный в списке этого окна, отмечается на схеме красным цветом. Нужный элемент фиксируется кнопкой **Выбрать**, после чего окно закрывается и этот элемент может быть использован для назначения нагрузки.

При вводе сосредоточенных нагрузок выполняется контроль привязки нагрузок в границах элемента и в случае, если нагрузка не попадает на элемент, выдается сообщение со списком элементов, которым не назначена нагрузка. Одновременно это сообщение дублируется в список выполненных операций в нижней части окна.

### Нагрузки по линии

Нагрузка на пластинчатые элементы может быть распределенной по **линии**, соединяющей два любых узла элемента. Для задания этой нагрузки необходимо выполнить следующие действия:

- активировать операцию **Нагрузки на пластины**;
- в диалоговом окне **Задание нагрузок на пластинчатые элементы** назначить вид нагрузки (равномерно распределенная или трапециевидная) и активировать маркер **По линии**;
- назначить систему координат, направление и величину нагрузки (после выбора вида нагрузки в окне демонстрируется пиктограмма, показывающая положительное направление ее действия);
- нажать кнопку **OK** в диалоговом окне;
- выбрать на схеме элементы, к узлам которых привязывается нагрузка;

- выбрать на схеме узлы, принадлежащие выбранным элементам, к которым привязывается нагрузка;
- нажать кнопку **ОК** в разделе **Загружения**.

Операция будет выполнена корректно, если у каждого выбранного элемента будет отмечено только два узла. В противном случае выдается сообщение об ошибке с указанием номеров элементов.

### *Корректировка ранее введенных нагрузок*

Для корректировки ранее введенных нагрузок выполняются следующие действия:

- из списка инструментальной панели режима **Загружения**, выбрать загружение, в котором корректируются нагрузки;
- активировать операцию **Нагрузки на пластины**;
- в таблице со списком введенных нагрузок диалогового окна **Задание нагрузок на пластинчатые элементы** отметить строку с корректируемой нагрузкой, после чего характеристики нагрузки (вид, направление, значение, привязка) попадают в соответствующие поля ввода;
- изменить характеристики нагрузки;
- нажать кнопку **Заменить и выйти**, если меняются характеристики только одной нагрузки (внесенные изменения будут выполнены после выхода из диалогового окна), или **Заменить и продолжить**, если в текущем загружении таких нагрузок несколько (в этом случае изменения будут отражаться в таблице после нажатия указанной кнопки).

Существует еще одна возможность откорректировать/удалить нагрузки на элемент, реализованная в режиме получения информации о нем (кнопка фильтров  ).

После завершения работы с текущим загружением его необходимо сохранить.

### *Использование характеристик ранее введенной нагрузки при вводе нагрузок*

Если при вводе очередной нагрузки окажется, что такая нагрузка (вид, величина, направление, …) уже использовалась в текущем загружении, то для ее повторного применения следует:

- активировать операцию **Нагрузки на пластины**;
- в таблице со списком введенных нагрузок диалогового окна **Задание нагрузок на пластинчатые элементы** отметить строку с характеристиками нужной нагрузки (характеристики нагрузки попадают в соответствующие поля ввода);
- нажать кнопку **ОК** (окно закрывается);
- назначить выбранную нагрузку на элементы.

После ввода и корректировки всех нагрузок загружение необходимо сохранить.

## Задание нагрузок на группу элементов

При назначении нагрузок на пластины предусмотрена возможность задания нагрузок гидростатического типа на группу элементов (или один элемент). Закон их изменения по пространственной координате, соответствующей «глубине водоема», является линейным. «Глубина водоема» может быть задана в любом направлении.

При вводе такие нагрузки (в виде трапециевидных нагрузок по полю элемента) будут изменяться по линейному закону от заданного начального значения до конечного в направлении развития (направление возрастания «глубины» назначается пользователем).

Для ввода нагрузок на группу элементов необходимо выполнить следующие действия:

- активировать операцию **Нагрузки на пластины**;
- в появившемся диалоговом окне **Задание нагрузок на пластинчатые элементы** активировать маркер **На группу элементов**;
- выбрать направление действия нагрузки;
- выбрать направление развития нагрузки;
- ввести начальное ($P_1$) и конечное ($P_2$) значения величины нагрузки и нажать кнопку **ОК** в диалоговом окне (начальное значение нагрузки $P_1$ будет привязано к узлу/узлам элементов с минимальным значением координаты в направлении развития);

– выбрать на расчетной схеме элементы и выполнить назначение, нажав кнопку **ОК** в разделе **Загружения** инструментальной панели или клавишу **Enter** на клавиатуре.

## Задание нагрузок на объемные элементы

В программе предусмотрено задание следующих видов нагрузок на объемные элементы:

- нагрузка от собственного веса;
- равномерно распределенная нагрузка по объему элемента;
- равномерно распределенная нагрузка на грани элемента;
- сосредоточенная нагрузка.

Выбор вида нагрузки выполняется в выпадающем меню, которое появляется после нажатия «правой стрелки». Исключение составляет нагрузка от собственного веса, которая задается, как и для других типов конечных элементов, активацией операции  .

Для задания равномерно распределенной нагрузки для любого типа элементов следует выполнить следующие действия:

– активировать операцию нажатием кнопки **Нагрузки на объемные элементы** («правая стрелка» для данного вида нагрузки не используется);

– в появившемся диалоговом окне **Распределенные нагрузки на объемные элементы** (рис. 8.1-10) выбрать систему координат, в которой будут действовать нагрузки, и направление их действия;

– задать величину нагрузки;

– выйти из диалогового окна нажатием кнопки **ОК** и выбрать на схеме элементы, которым назначается нагрузка;

– нажать кнопку **ОК** в инструментальной панели.

***Следует помнить, что распределенные нагрузки в местной системе координат можно задать только элементам типа 31 (параллелепипед) и 33 (трехгранная призма).***

Равномерно распределенная нагрузка на грани элементов задается в зависимости от вида элементов и выбирается в выпадающем меню. Правила нумерации граней приведены на рисунке 3.5-1 и продублированы на пиктограммах в соответствующих диалоговых окнах.

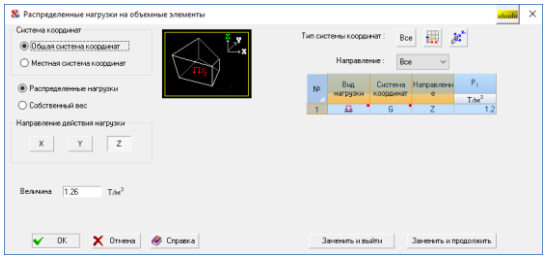


Рис. 8.1-10. *Диалоговое окно* **Распределенные нагрузки на объемные элементы**

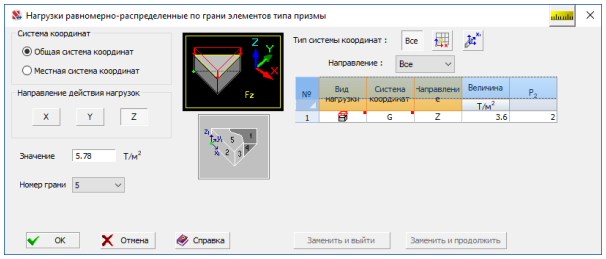


Рис. 8.1-11. *Диалоговое окно* **Нагрузки равномерно распределенные на грани элементов …**

Рекомендуются следующие правила задания нагрузок на грани элементов, при условии назначения граней по их номеру:

– активировать операцию путем нажатия на «правую стрелку» и выбора раздела выпадающего меню, соответствующего виду элементов;

– в появившемся диалоговом окне **Нагрузки равномерно распределенные на грани элементов …** (рис. 8.1-11) выбрать систему координат, в которой будут действовать нагрузки, и направление их действия;

- задать величину нагрузки;
- выбрать из выпадающего списка номер грани, на которую будут задаваться нагрузки;
- выйти из диалогового окна нажатием кнопки **OK** и выбрать на схеме элементы, которым назначается нагрузка;
- нажать кнопку **OK** в инструментальной панели.

Поскольку нумерация граней привязана к местной системе координат каждого элемента, то может возникнуть ситуация, при которой не удастся задать нагрузки сразу всем нужным элемента, т.к. их местные оси не совпадают по направлению, а значит, не совпадают по положению в схеме и одноименные грани. В таком случае можно воспользоваться операцией назначения нагрузки, у которой предусмотрена возможность выбора граней не по номеру, а по принадлежащим грани (выбранным) узлам. Эта операция вызывается из раздела выпадающего меню **Нагрузка на грани отмеченных объемных элементов**.

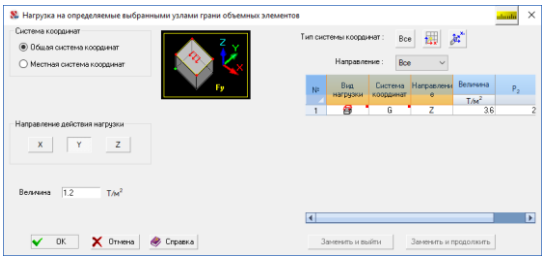



Рис. 8.1-12. *Диалоговое окно*
**Нагрузка на грани отмеченных объемных элементов**

Для выполнения последней операции следует:

- активировать операцию путем нажатия  на «правую стрелку» и выбора указанного выше раздела выпадающего меню;
- в появившемся диалоговом окне (рис. 8.1-12) выбрать систему координат, в которой будут действовать нагрузки, и направление их действия;
- задать величину нагрузки;
- выйти из диалогового окна нажатием кнопки **OK** и выбрать на схеме элементы, которым назначается нагрузка;
- нажать кнопку **OK** в инструментальной панели;
- после появления сообщения **Выберите узлы** отметить узлы, которые принадлежат нагружаемым граням;
- нажать кнопку **OK** в инструментальной панели.

После выполнения операции в таблице нагрузок соответствующего диалогового окна в графе $P_2$ указан номер грани, к которой привязана нагрузка.

Корректировка параметров ранее заданной нагрузки выполняется по тем же правилам, что и для других типов элементов, т.е. с использованием операций **Заменить и выйти** или **Заменить и продолжить**. Рекомендуется следующий порядок выполнения операций корректировки:

- установить в списке инструментальной панели **Загружения** номер загружения, которому принадлежат корректируемые нагрузки;
- выбрать с помощью правой стрелки раздел меню с видом нагрузки;
- в таблице нагрузок диалогового окна указать курсором на строку с корректируемой нагрузкой;
- изменить параметры нагрузки и зафиксировать новые значения кнопками **Заменить и выйти** или **Заменить и продолжить**;

- после завершения корректировки сохранить новое состояние загружения, используя соответствующую операцию и опцию **Заменить** или создать на базе предыдущего загружения — новое.

При корректировке величины нагрузки следует помнить, что для нагрузок от собственного веса в таблицах диалоговых окон в графе $P_1$ указывается не величина нагрузки, а коэффициент, с которым эта нагрузка вошла в текущее загружение. При изменении величины коэффициента (путем выбора соответствующей строки в таблице нагрузок диалогового окна) маркер вида нагрузки автоматически переключится в состояние **Собственный вес**.

## Температурные нагрузки



Назначение температурных нагрузок выполняется в зависимости от типа элемента. В программе предусмотрено задание следующих видов температурной нагрузки:

- нагрузки на стержни:
  - вдоль стержня (по направлению местной оси $X_1$);
  - вдоль местной оси $Y_1$;
  - вдоль местной оси $Z_1$;
- нагрузки на плиты:
  - по всему полю элемента;
  - изгиб вокруг местной оси $X_1$;
  - изгиб вокруг местной оси $Y_1$;
- нагрузки на балки-стенки:
  - по всему полю элемента;
  - вдоль местной оси $X_1$;
  - вдоль местной оси $Z_1$ (ось $Z_1$ элементов балки-стенки лежит в плоскости элемента);
- нагрузки на оболочки:
  - по всему полю элемента;
  - вдоль местной оси $X_1$;
  - вдоль местной оси $Y_1$;
  - изгиб вокруг местной оси $X_1$;
  - изгиб вокруг местной оси $Y_1$;
- нагрузки на объемные элементы:
  - температурная нагрузка по всему объему элемента.

При назначении температурных нагрузок рекомендуется следующий порядок действий:

- нажать кнопку **Температурные нагрузки** в разделе **Загружения** инструментальной панели;
- в выпадающем меню выбрать тип элементов, которым назначаются нагрузки;
- в диалоговом окне **Температурные нагрузки…**, выбор которого будет зависеть от указанного типа элемента, активировать маркер, определяющий вид нагрузки (например, **температурная нагрузка на стержни** задается в одноименном диалоговом окне (рис. 8.1-13);
- назначить параметры нагрузки;
- выйти из диалогового окна, нажав кнопку **ОК**;
- выбрать на схеме элементы, которым назначается введенный тип нагрузки;
- нажать кнопку **ОК** в инструментальной панели или клавишу **Enter** на клавиатуре.

Если при назначении нагрузок была нажата кнопка фильтров **Температурные нагрузки**  , то введенные нагрузки будут отображаться на схеме.

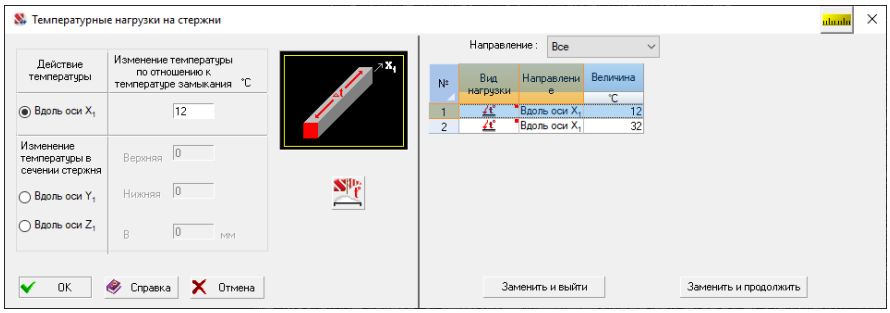



Рис. 8.1-13. *Диалоговое окно* **Температурные нагрузки на стержни**

### Корректировка ранее введенных нагрузок

Для корректировки ранее введенных нагрузок выполняются следующие действия:

- из списка инструментальной панели режима **Загружения**, выбрать загружение, в котором корректируются нагрузки;
- активировать операцию **Температурные нагрузки**;
- в выпадающем меню выбрать тип элементов, которым назначаются нагрузки;
- в таблице со списком введенных нагрузок диалогового окна **Температурные нагрузки** отметить строку с корректируемой нагрузкой, после чего характеристики нагрузки попадают в соответствующие поля ввода (например, **температурная нагрузка на стержни** задается в одноименном диалоговом окне, показанном на рис. 8.1-13);
- изменить характеристики нагрузки (в том числе и вид, если это необходимо);
- нажать кнопку **Заменить и выйти**, если меняются характеристики только одной нагрузки (внесенные изменения будут выполнены после выхода из диалогового окна), или **Заменить и продолжить**, если в текущем загружении таких нагрузок несколько (в этом случае изменения будут отражаться в таблице после нажатия указанной кнопки).

Существует еще одна возможность откорректировать/удалить нагрузки на элемент, реализованная в режиме получения информации об элементе (кнопка фильтров  ).

После завершения работы с текущим загружением его необходимо сохранить.

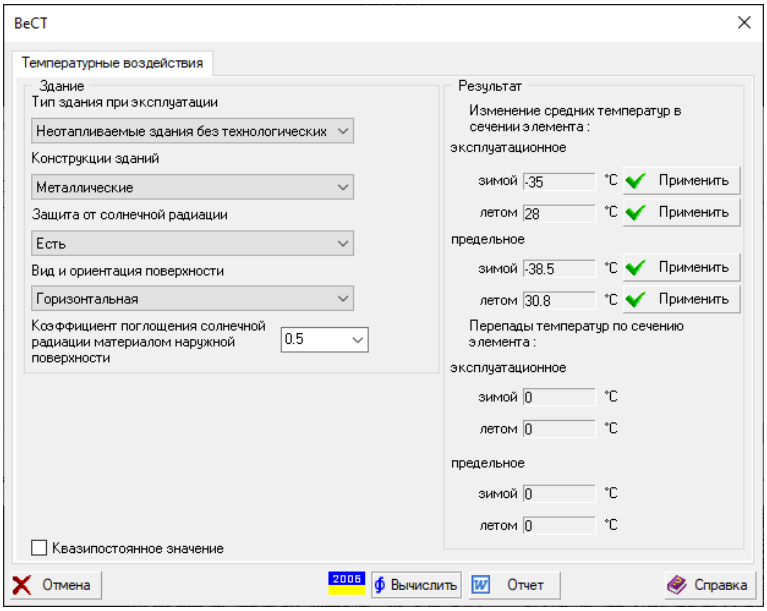



Рис. 8.1-14. *Диалоговое окно* **Климатические температурные нагрузки**

Для некоторых типов температурных нагрузок активной является кнопка  , нажатие которой вызывает режим **Температура** программы **ВеСТ**. При этом появляется окно (рис. 8.1-14),

позволяющее выбрать параметры климатического температурного воздействия. После нажатия кнопки **Вычислить** в этом окне нужно нажать кнопку **Применить** (относящуюся, например, к зимнему или летнему периоду) и тем самым перенести величину температурного воздействия в параметры нагрузки программы **SCAD**.

### *Использование характеристик ранее введенной нагрузки при вводе нагрузок*

Если при вводе очередной нагрузки окажется, что такая нагрузка (вид, величина, направление, …) уже использовалась в текущем загружении, то для ее повторного применения следует:

- активировать операцию **Температурные нагрузки**;
- в выпадающем меню выбрать тип элементов, которым назначаются нагрузки;
- в таблице со списком введенных нагрузок диалогового окна **Температурные нагрузки** отметить строку с характеристиками нужной нагрузки (характеристики нагрузки попадают в соответствующие поля ввода);
- нажать кнопку **OK** (окно закрывается);
- назначить выбранную нагрузку на элементы.

После ввода и корректировки всех нагрузок загружение необходимо сохранить.

## Нагрузки на области



При назначении нагрузок на области предусмотрена возможность задания нагрузок на линии и области, которые "не связаны" с сеткой конечных элементов. Линии нагрузок представляют собой отрезки или полилинии, вершины которых совпадают с узлами расчетной схемы. Область нагрузок — многоугольник с вершинами совпадающими с узлами расчетной схемы.

Вид, направление и величина нагрузок назначаются в диалоговом окне **Задание нагрузок на область** (рис. 8.1-15), которое появляется после нажатия соответствующей кнопки в инструментальной панели раздела **Загружения**.

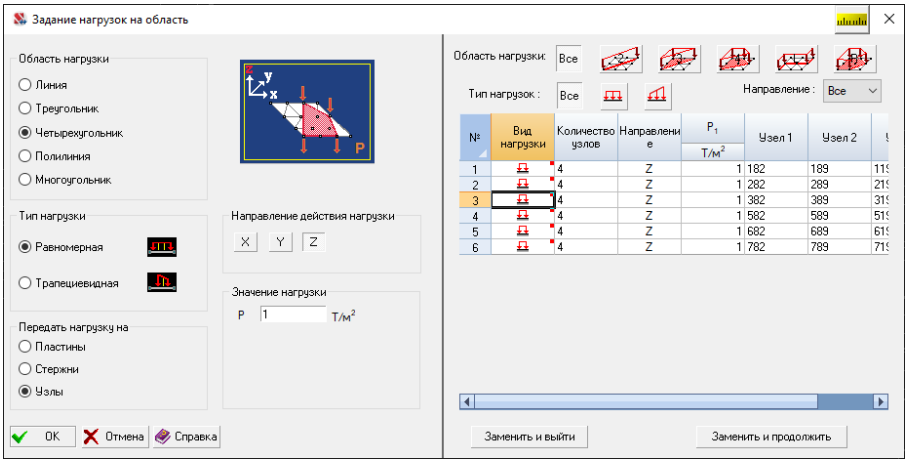



Рис. 8.1-15. *Диалоговое окно* **Задание нагрузок на область**

В программе предусмотрены следующие виды нагрузок:

- равномерно распределенные и трапециевидные нагрузки по линии;
- равномерно распределенные и трапециевидные нагрузки на треугольник;
- равномерно распределенные и трапециевидные нагрузки на четырехугольник;
- равномерно распределенные нагрузки на полилинию;
- равномерно распределенные нагрузки на произвольный многоугольник.

Все виды нагрузок задаются в общей системе координат.

Действие нагрузки передается только на пластинчатые элементы, если область нагрузки является линией или полилинией. При этом расстояние от узлов области нагрузки до плоскости, в

которой лежит тот или иной пластинчатый элемент не должно превышать величины **Точность оценки положения областной нагрузки**, которая задается в параметрах расчета (страница **Специальные**).

В тех случаях, когда областью нагрузки является многоугольник (в частности, треугольник или четырехугольник), нагрузка может быть передана на пластины, узлы или стержни (нужная опция должна быть выбрана пользователем в диалоговом окне).

Рекомендуется следующий порядок ввода нагрузок на область:

- активировать операцию **Нагрузки на область**;
- в диалоговом окне **Задание нагрузок на область** назначить вид, направление, величину (величины — в случае трапециевидной) нагрузки (после выбора вида нагрузки в окне демонстрируется пиктограмма, показывающая положительное направление ее действия);
- выйти из диалогового окна нажатием кнопки **OK**;
- выбрать на схеме узлы, которые определяют линию/полилинию/область;
- завершение ввода полилинии выполняется двойным щелчком мыши после ввода последнего узла или нажатием кнопки **OK** в инструментальной панели или клавиши **Enter** на клавиатуре. При вводе области завершить ввод можно также путем выбора первого узла.

В таблице диалогового окна отображаются характеристики всех, ранее заданных в текущем загружении, нагрузок на области. Эти данные могут использоваться для ввода новых нагрузок или корректировки ранее введенных. Для селекции нагрузок по виду и направлению действия используется набор кнопок-маркеров с изображением вида нагрузки, а также выпадающий список **Направление** (по умолчанию отображаются все нагрузки по всем направлениям).

### *Корректировка ранее введенных нагрузок*

Для корректировки ранее введенных нагрузок выполняются следующие действия:

- из списка инструментальной панели режима **Загружения**, выбрать загружение, в котором корректируются нагрузки на область;
- активировать операцию **Нагрузки на область**;
- в таблице со списком введенных нагрузок диалогового окна **Задание нагрузок на область** отметить строку с корректируемой нагрузкой, после чего характеристики нагрузки (вид, направление, значения) попадают в соответствующие поля ввода;
- изменить характеристики нагрузки;
- нажать кнопку **Заменить и выйти**, если меняются характеристики только одной нагрузки (внесенные изменения будут выполнены после выхода из диалогового окна), или **Заменить и продолжить**, если в текущем загружении таких нагрузок несколько (в этом случае изменения будут отражаться в таблице после нажатия указанной кнопки).

Режим корректировки не используется для ввода новых нагрузок, т.к. характеристики нагрузки меняются «по месту» и не запоминаются. После завершения работы с текущим загружением его необходимо сохранить.

### *Использование характеристик ранее введенной нагрузки при вводе нагрузок*

Если при вводе очередной нагрузки окажется, что такая нагрузка (вид, величина, направление, …) уже использовалась в текущем загружении, то для ее повторного применения следует:

- активировать операцию **Нагрузки на области**;
- в таблице со списком введенных нагрузок диалогового окна **Задание нагрузок на области** отметить строку с характеристиками нужной нагрузки (характеристики нагрузки попадают в соответствующие поля ввода);
- нажать кнопку **OK** (окно закрывается);
- выбрать новую линию или область нагрузки.

После ввода и корректировки всех нагрузок загружение необходимо сохранить.

Предусмотрено также табличное представление информации о нагрузках на области для выбранного загружения.

## 8.2. Расчет на заданные перемещения

В программе предусмотрены два варианта расчета на заданные перемещения — путем использования так называемых нуль-элементов, позволяющих задать смещение, не совпадающее по направлению с направлением осей общей системы координат, и путем задания смещения связи в направлении осей общей системы координат.

### Нагрузки через «нуль-элемент»



При расчете на заданные перемещения с использованием «нуль-элемента» (тип 154) смещения задаются в соответствии с признаком схемы как нагрузки относительно локальных осей «нуль-элемента».

Фактически, «нуль-элемент» играет роль связи, заданной в системе координат, совпадающей с локальной системой координат элемента, в направлениях, по которым в элементе назначены ненулевые жесткости. Таким образом, задание смещения через «нуль-элемент», является смещением связи.

Величина смещения назначается для линейных перемещений в единицах длины, указанных в диалоговом окне (например, в метрах), аналогично, для угловых перемещений — в единицах измерения углов. Положительное направление линейных смещений совпадает с направлением местных осей элемента, а угловых — по направлению часовой стрелки, если смотреть с конца соответствующей оси.

Направление и величина перемещения задаются в диалоговом окне **Расчет на заданные перемещения** (рис. 8.2-1).

При назначении нагрузок рекомендуется следующий порядок действий:

- нажать кнопку **Нагрузка вида «заданное перемещение» (через 0-элемент)** в разделе **Загружения** инструментальной панели;
- в диалоговом окне **Расчет на заданные перемещения** активировать маркер, определяющий направление смещения;
- задать значение смещения;
- выйти из диалогового окна, нажав кнопку **ОК**;
- выбрать на схеме «нуль-элементы», которым назначается заданное смещение;
- нажать кнопку **ОК** в инструментальной панели или клавишу **Enter** на клавиатуре.

Если при назначении нагрузок была нажата кнопка фильтров **Отображение заданных перемещений**  , то введенные нагрузки будут отображаться на схеме.

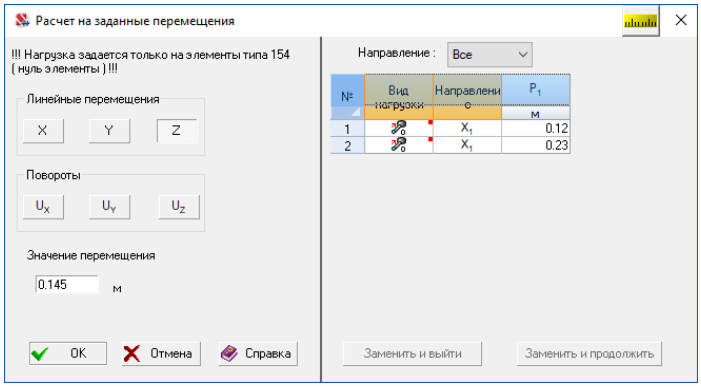



Рис. 8.2-1. *Диалоговое окно* **Расчет на заданные перемещения**



**Заданные перемещения можно вводить только в направлениях, по которым в «нуль-элементе» назначены ненулевые жесткости.**

### Корректировка ранее введенных нагрузок

Для корректировки ранее введенных нагрузок выполняются следующие действия:

- из списка инструментальной панели режима **Загружения**, выбрать загружение, в котором корректируются нагрузки;
- активировать операцию **Нагрузка вида «заданное перемещение» (через 0-элемент)**;
- в таблице со списком введенных нагрузок диалогового окна отметить строку с корректируемой нагрузкой, после чего характеристики нагрузки попадают в соответствующие поля ввода;
- изменить характеристики нагрузки (в том числе и направление, если это необходимо);
- нажать кнопку **Заменить и выйти**, если меняются характеристики только одной нагрузки (внесенные изменения будут выполнены после выхода из диалогового окна), или **Заменить и продолжить**, если в текущем загружении таких нагрузок несколько (в этом случае изменения будут отражаться в таблице после нажатия указанной кнопки).

Существует еще одна возможность откорректировать/удалить нагрузки на элемент, реализованная в режиме получения информации об элементе (кнопка фильтров  ).

После завершения работы с текущим загружением его необходимо сохранить.

### Использование характеристик ранее введенной нагрузки при вводе нагрузок

Если при вводе очередной нагрузки окажется, что такая нагрузка (вид, величина, направление, …) уже использовалась в текущем загружении, то для ее повторного применения следует:

- активировать операцию **Нагрузка вида «заданное перемещение» (через 0-элемент)**;
- в таблице со списком введенных нагрузок диалогового окна отметить строку с характеристиками нужной нагрузки (характеристики нагрузки попадают в соответствующие поля ввода);
- нажать кнопку **OK** (окно закрывается);
- назначить выбранную нагрузку на «нуль-элементы».

После ввода и корректировки всех нагрузок загружение необходимо сохранить.

## Задание нагрузки через смещение связи



Для расчета на заданные перемещения в системе координат задачи можно воспользоваться заданием узловой нагрузки специального вида — смещением связи.

Нагрузка может быть задана только в тех узлах, в которых установлена связь по направлению задаваемого смещения. Величина смещения для линейных перемещений назначается в установленных для задачи единицах длины (например, в метрах), а для угловых перемещений — в радианах или градусах. Положительное направление линейных смещений совпадает с направлением осей общей системы координат, а угловых — с направлением движения часовой стрелки, если смотреть с конца соответствующей оси. Направление и величина смещения задаются в диалоговом окне **Расчет на заданные перемещения** (рис. 8.2-2).

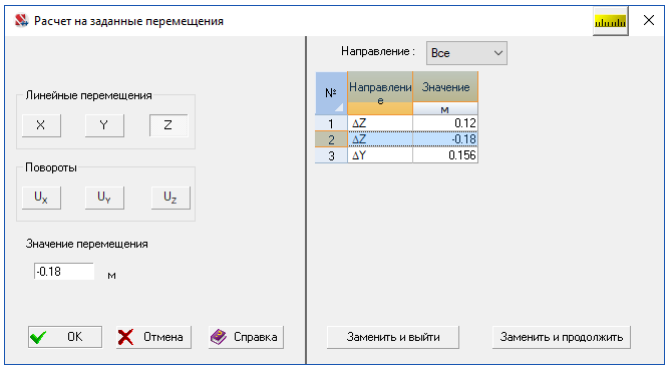



Рис. 8.2-2. *Диалоговое окно* **Расчет на заданные перемещения**

При назначении нагрузок рекомендуется следующий порядок действий:
- нажать кнопку **Нагрузка вида «заданное перемещение» (через смещение связи)** в разделе **Загружения** инструментальной панели;
- в диалоговом окне **Расчет на заданные перемещения** активировать маркер, определяющий направление смещения;
- задать значение смещения;
- выйти из диалогового окна, нажав кнопку **ОК**;
- выбрать на схеме узлы, к которым прикладывается заданное смещение;
- нажать кнопку **ОК** в инструментальной панели или клавишу **Enter** на клавиатуре.

Если при назначении нагрузок была нажата кнопка фильтров **Отображение заданных перемещений**  , то введенные нагрузки будут отображаться на схеме.

### *Корректировка ранее введенных нагрузок*

Для корректировки ранее введенных нагрузок выполняются следующие действия:
- из списка инструментальной панели режима **Загружения**, выбрать загружение, в котором корректируются нагрузки;
- активировать операцию **Нагрузка вида «заданное перемещение» (через смещение связи)**;
- в таблице со списком введенных нагрузок диалогового окна отметить строку с корректируемой нагрузкой, после чего характеристики нагрузки попадают в соответствующие поля ввода;
- изменить характеристики нагрузки (в том числе и направление, если это необходимо);
- нажать кнопку **Заменить и выйти**, если меняются характеристики только одной нагрузки (внесенные изменения будут выполнены после выхода из диалогового окна), или **Заменить и продолжить**, если в текущем загружении таких нагрузок несколько (в этом случае изменения будут отражаться в таблице после нажатия указанной кнопки).

Существует еще одна возможность откорректировать/удалить нагрузки на узел, реализованная в режиме получения информации об узле (кнопка фильтров  ).

После завершения работы с текущим загружением его необходимо сохранить.

### *Использование характеристик ранее введенной нагрузки при вводе нагрузок*

Если при вводе очередной нагрузки окажется, что такая нагрузка (вид, величина, направление, …) уже использовалась в текущем загружении, то для ее повторного применения следует:
- активировать операцию **Нагрузка вида «заданное перемещение» (через смещение связи)**;
- в таблице со списком введенных нагрузок диалогового окна отметить строку с характеристиками нужной нагрузки (характеристики нагрузки попадают в соответствующие поля ввода);
- нажать кнопку **ОК** (окно закрывается);
- назначить выбранную нагрузку.

После ввода и корректировки всех нагрузок загружение необходимо сохранить.

## 8.3. Запись загружений



После завершения ввода нагрузок текущее загружение необходимо сохранить. Для этого используется операция **Сохранить/Добавить загружение**. После активации этой операции появляется диалоговое окно **Сохранение загружения** (рис. 8.3-1).

Если загружение новое, то ему следует задать имя, назначить тип загружения и вид нагрузки (эти параметры выбираются из одноименных списков). Кроме того, загружению назначается коэффициент надежности по нагрузке и доля длительности. Если значения нагрузок заданы исходя из их нормативных (характеристических) значений, то следует активировать одноименный маркер.

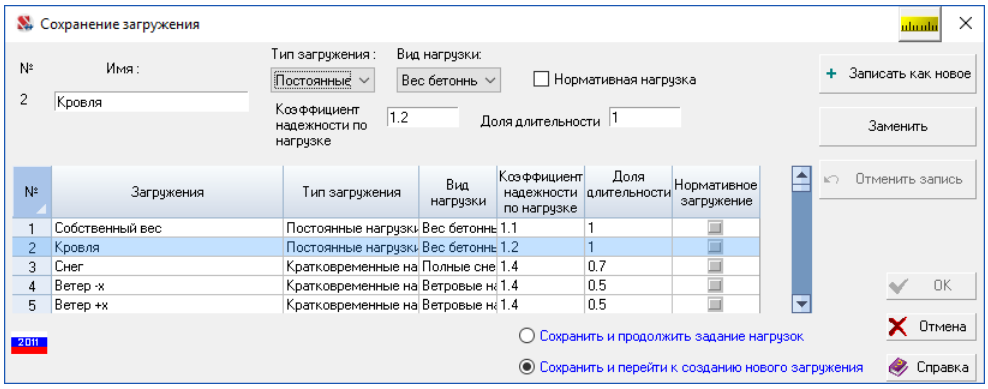



Рис. 8.3-1. *Диалоговое окно* **Сохранение загружения**

После назначения характеристик нового загружения, его сохранение выполняется нажатием кнопки **Записать как новое**. Если сохранение выполняется после корректировки уже существующего (ранее записанного) загружения, то используется кнопка **Заменить**. Перед выходом из диалогового окна по кнопке **ОК** следует указать, с каким загружением предполагается продолжение работы — с текущим, и тогда активируется маркер **Сохранить и продолжить задание нагрузок**, или с новым — активируется маркер **Сохранить и перейти к созданию нового загружения**.

Особенностью операции является ее прямая связь с операцией подготовки исходных данных для формирования расчетных сочетаний усилий (РСУ) и перемещений (РСП) (см. главу 18). Если параметры загружения заданы корректно, то они используются в качестве характеристик загружения при формировании РСУ. Одновременно, изменение характеристик загружения при подготовке исходных данных РСУ, отображаются в окне **Сохранение загружения** (исключение составляет случай, при котором для сейсмического загружения в данных РСУ производится замена такого типа, как, например, на постоянное).

Если исходные данные подготовлены в форматах так называемых «старых РСУ» версий 11.x и более ранних, то перед тем, как приступить к формированию или корректировке загружений, следует вызвать из дерева проектов операцию подготовки данных для выбора РСУ, и тем самым перевести данные в новый формат. При этом чаще всего может оказаться, что формального преобразования формата не достаточно и необходимо будет выполнить корректировку данных.

## 8.4. Группы нагрузок

Группы нагрузок — это аналоги загружений, которые отличаются от последних тем, что, во-первых, они не учитываются в расчете в качестве загружений, а используются только на стадии формирования загружений и, во-вторых, могут быть добавлены в любое загружение. Группы нагрузок используются в тех случаях, когда некоторый набор нагрузок на узлы и/или элементы включается в несколько загружений в исходном виде или с разными коэффициентами. Кроме того, они могут использоваться в качестве «добавки» к накапливаемому загружению при расчете конструкций с учетом очередности возведения (режим **Монтаж**), а также для задания веса элементов разрушенных конструкций при моделировании прогрессирующего обрушения.

Группы нагрузок формируются из наборов нагрузок или из ранее созданных загружений.

Для создания группы из нагрузок следует выполнить следующие действия:

- ввести нагрузки, которые надо поместить в группу (для очистки буферной памяти перед вводом новой группы нагрузок используется кнопка **Снять все нагрузки** —  );
- нажать кнопку **Добавить группу нагрузок**  ;
- в открывшемся диалоговом окне **Сохранение группы нагрузок** (рис. 8.4-1) ввести уникальное имя группы (имя обязательно, так как группы номеров не имеют) и нажать кнопку **ОК**.

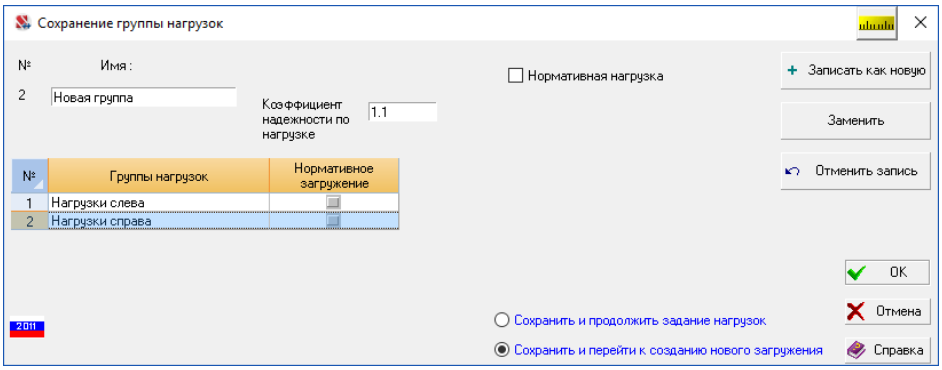



Рис. 8.4-1. *Диалоговое окно* **Сохранение группы нагрузок**

После выполнения этих операций наименование введенной группы попадает в список **Выбор группы нагрузок** инструментальной панели.

Для включения группы в загружение достаточно выбрать из списка нужную группу. В одно загружение можно включать любое количество групп.

Добавление групп в загружение выполняется по следующим правилам:

1. Загружение имеет признак “нормативная нагрузка”; добавляемая группа имеет признак “нормативная нагрузка”:

*значения нагрузок группы не меняются.*

2. Загружение имеет признак “нормативная нагрузка”; добавляемая группа имеет признак “расчетная нагрузка”:

*перед добавлением в загружение значения нагрузок группы делятся на коэффициент надежности по нагрузке, указанный при создании* ***группы***.

3. Загружение имеет признак “расчетная нагрузка”; добавляемая группа имеет признак “нормативная нагрузка”.

*перед добавлением в загружение значения нагрузок группы делятся на коэффициент надежности по нагрузке, указанный при создании группы и умножаются на коэффициент надежности по нагрузке* ***загружения***.

4. Загружение имеет признак “расчетная нагрузка”; добавляемая группа имеет признак “расчетная нагрузка”.

*значения нагрузок группы не меняются.*

5. Если буферная память нагрузок пуста, то при загрузке группы, нагрузкам в памяти будет присвоен признак, соответствующий признаку этой группы с заданным для группы коэффициентом надежности по нагрузке.

Если в качестве группы выступает целое загружение, его можно записать и как загружение и как группу.

Перед созданием *нового* загружения или группы нагрузок необходимо очистить буферную память от нагрузок, используя для этого операцию **Снять все нагрузки** —  . Если окажется, что буферная память содержит нагрузки, которые не сохранены в качестве загружения или группы, выдается соответствующее предупреждение с предложением сохранить нагрузки или отказаться от их сохранения.

## Задание нагрузок с использованием групп узлов и элементов

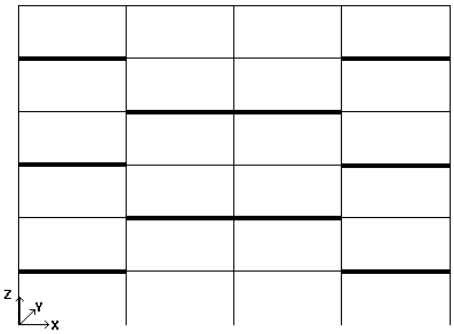


Рис. 8.4-2. *Расчетная схема* (выбранные элементы выделены жирной линией)

Группы узлов и элементов могут быть эффективно использованы при задании нагрузок. Если при подготовке расчетной схемы часть элементов в различных загружениях получает одинаковые нагрузки, то эти элементы удобно объединять в группы. Перед назначением нагрузки следует выбрать нужную группу, ввести параметры нагрузки и нажать кнопку **ОК** в разделе **Загружения** инструментальной панели.

В качестве примера рассмотрим расчетную схему, приведенную на рис. 8.4-2.

Если в процессе описания нагрузок на выбранные элементы (на рисунке они выделены жирной линией) в разных загружениях назначается однотипная нагрузка, то имеет смысл запомнить эти элементы как группу. Вся дальнейшая работа будет проходить по следующему сценарию:

- перед заданием нагрузок выбрать нужную группу из списка **Выбор группы элементов** (раздел **Группы** инструментальной панели);
- в разделе **Загружения** установить тип, а также ввести направление и величину нагрузки;
- назначить нагрузку элементам группы.

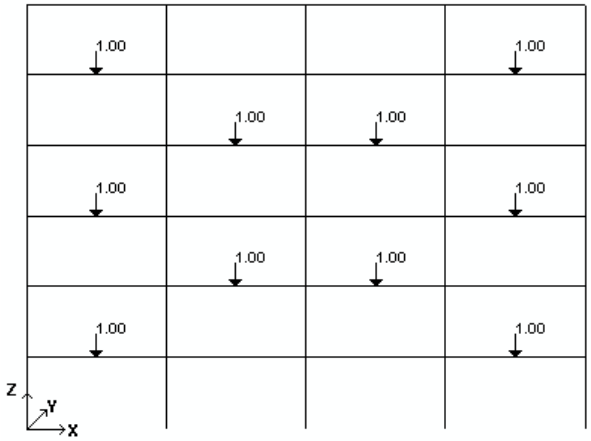



Рис. 8.4-3. *Во всех элементах группы приложена сосредоточенная сила*

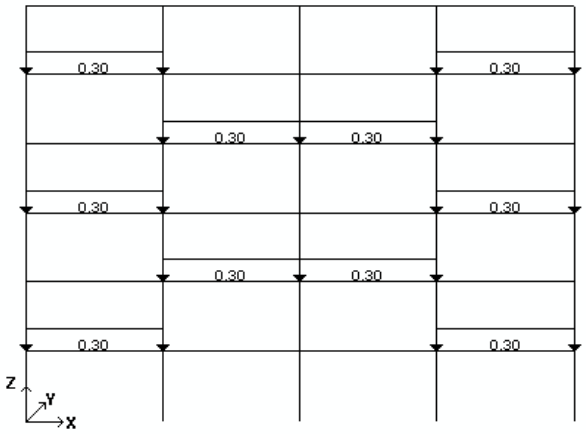



Рис. 8.4-4. *На всех элементах группы задана распределенная нагрузка*

В результате все элементы группы получат заданную нагрузку, например, сосредоточенная сила 1 Т по направлению Z (рис. 8.4-3). Повторим описанные выше действия для этой же группы, назначив элементам распределенную нагрузку 0.3 Т (рис. 8.4-4).

Таким образом, если в одном или нескольких загружениях используются одни и те же элементы при назначении нагрузок, то такие элементы удобно объединять в именованные группы. Аналогично можно работать и с группами узлов.

## Сборка загружений из групп нагрузок



Операция используется для формирования загружений с использованием групп нагрузок. Предусмотрена возможность включения группы в существующие загружения или формирование нового загружения из групп. Диалоговое окно с соответствующим названием появляется после выбора вида операции в выпадающем меню.

Операция **Включение группы в загружения** позволяет добавить в различные загружения группу нагрузок с заданным коэффициентом (рис. 8.4-5). Для выполнения этой операции следует:

- из списка **Группы нагрузок** выбрать группу, которая включается в одно или несколько загружений;
- в таблице активировать маркеры загружений, в которые включается выбранная группа;
- ввести коэффициенты, с которыми группа входит в загружения;
- нажать кнопку **OK**.

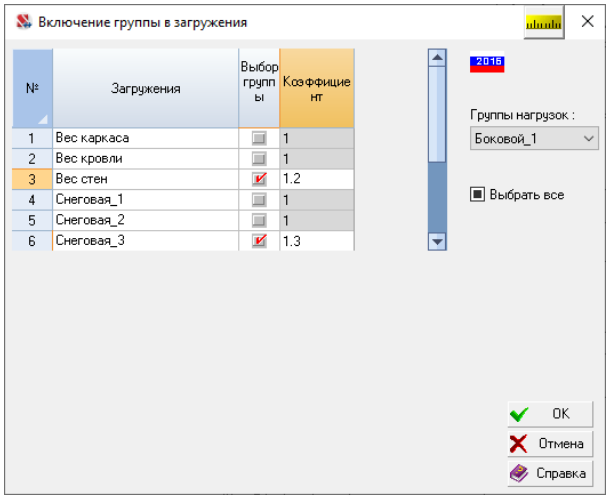


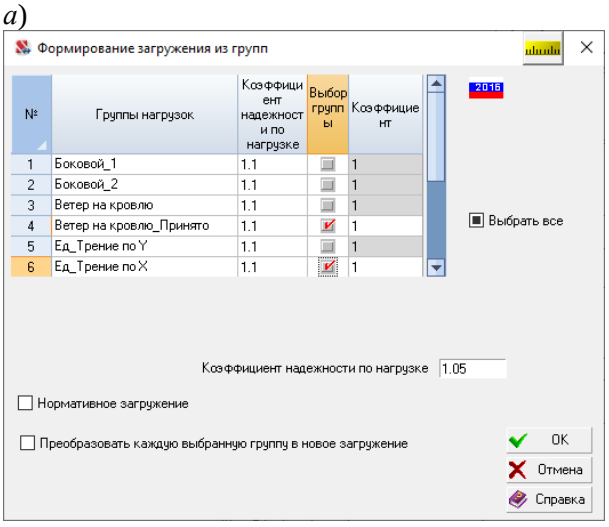

Рис. 8.4-5. *Диалоговое окно* **Включение группы в загружения**

Операция **Формирование загружения из групп** (рис. 8.4-6, *а*) предназначена для формирования нового загружения из групп нагрузок. При этом каждая группа может входить в загружение со своим коэффициентом. Для выполнения этой операции следует:

- в таблице активировать маркеры групп, из которых формируется загружение;
- назначить этим группам коэффициенты;
- активировать маркер **Нормативное загружение**, если включаемые в него нагрузки следует хранить в виде нормативных значений (если в качестве нормативного документа по вычислению комбинаций нагрузок выбран EN 1990, то данный элемент управления отсутствует);
- нажать кнопку **OK**.

После выхода из диалогового окна новое загружение необходимо сохранить, воспользовавшись кнопкой **Сохранить/Добавить загружение**  .

*а*)




*б*)

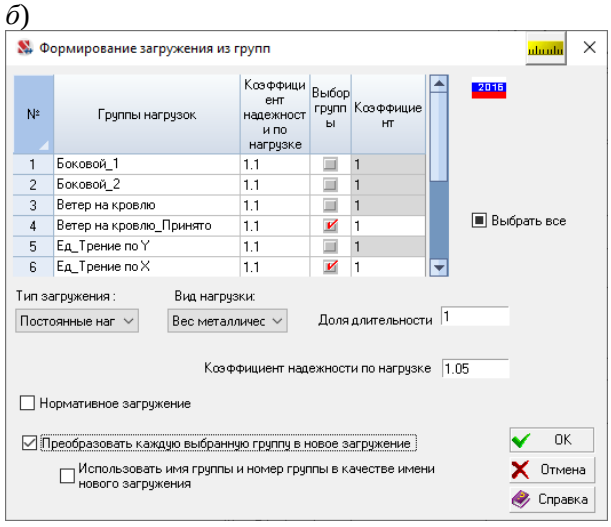



Рис. 8.4-6. *Диалоговое окно* **Формирование загружения из групп**

Если есть необходимость сформировать отдельное загружение из каждой выбранной группы нагрузок, то следует активировать маркер **Преобразовать каждую выбранную группу в новое загружение** (рис. 8.4-6, *б*). Очевидно, что для корректного выполнения этой операции группы должны обладать определенными свойствами, а именно: нагрузки, объединенные в группы, должны относиться к одному типу загружения, иметь одинаковую долю длительности и коэффициент надежности по нагрузке. Эти параметры выбираются из соответствующих списков. Для того, чтобы имя загружения отличалось от имени группы следует активировать маркер **Использовать имя группы и номер группы в качестве имени нового загружения**. Например, группа нагрузок «Полы», занимающая в списке групп третью позицию (рис. 8.4-6, *б*), в качестве загружения получит имя «3_Полы».

### Назначение коэффициентов группам нагрузок



Эта операция позволяет назначить коэффициенты группам, которые добавляются в загружения «традиционным» способом, т. е. путем их выбора из списка в инструментальной панели. В диалоговом окне **Назначение коэффициентов масштабирования** (рис. 8.4-7) можно выбрать порядок назначения — использовать введенное значение коэффициента для всех добавляемых групп или запрашивать коэффициент для каждой группы.

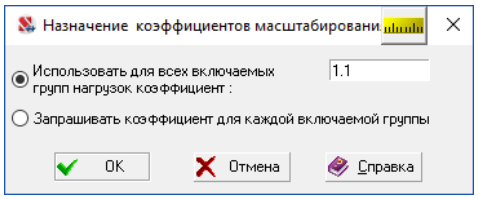



Рис. 8.4-7. *Диалоговое окно* **Назначение коэффициентов масштабирования**

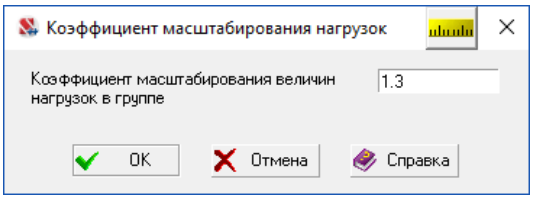



Рис. 8.4-8. *Диалоговое окно* **Коэффициент масштабирования нагрузок**

Во втором случае после выбора группы из списка появляется диалоговое окно **Коэффициент масштабирования нагрузок** (рис. 8.4-8), в котором задается коэффициент для выбранной группы.

## 8.5. Удаление нагрузок, загружений и групп нагрузок

### Удаление нагрузок



Для управления удалением нагрузок из текущего загружения используется диалоговое окно **Удаление нагрузок** (рис. 8.5-1), которое вызывается нажатием соответствующей кнопки в разделе **Загружения** инструментальной панели. Для удаления всех нагрузок с выбранных узлов или элементов следует:

- активировать в диалоговом окне опцию с наименованием выполняемой операции **Все нагрузки** в одной из групп **Удаление узловых нагрузок с выбранных узлов** или **Удаление нагрузок с выбранных элементов**;
- нажать кнопку **ОК** (диалоговое окно закроется);
- выбрать на схеме элементы или узлы, с которых удаляются нагрузки;
- нажать кнопку **ОК** в разделе **Загружения**.

Нагрузки можно удалить выборочно, указав их вид и направление. Для этого необходимо:

- активировать в диалоговом окне опцию с наименованием выполняемой операции **Указанные нагрузки** и **По виду, направлению** в зависимости от вида нагрузок (узловые или на элементах);
- установить с помощью кнопок или маркеров параметры удаляемой нагрузки;
- нажать кнопку **ОК** (диалоговое окно закроется);
- выбрать на схеме элементы или узлы, с которых удаляются нагрузки;
- нажать кнопку **ОК** в разделе **Загружения**.

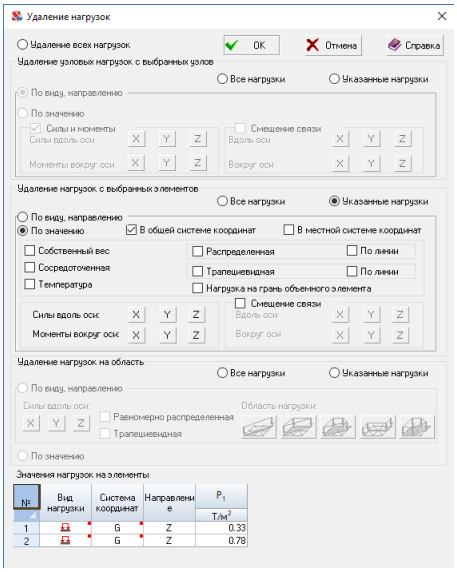



Рис. 8.5-1. *Диалоговое окно* **Удаление нагрузок**

Предусмотрена также возможность удаления нагрузок определенного значения. Для этого следует выполнить следующие действия:

- активировать в диалоговом окне опцию с наименованием выполняемой операции **Указанные нагрузки** и **По значению** в зависимости от вида нагрузок (узловые или на элементах);
- отметить в таблице значения удаляемых нагрузок;
- нажать кнопку **ОК** (диалоговое окно закроется);
- выбрать на схеме элементы или узлы, с которых удаляются нагрузки;
- нажать кнопку **ОК** в разделе **Загружения**.

Существует еще одна возможность удалить нагрузки, реализованная в режиме получения информации об узле или элементе (кнопки фильтров  и  , соответственно). В этом случае нагрузки можно удалить с конкретного объекта.

## Удаление загружений и групп нагрузок



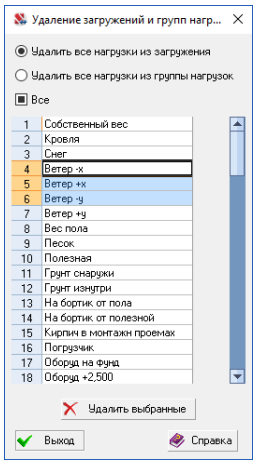



Рис. 8.5-2. *Диалоговое окно* **Удаление загружений и групп нагрузок**

С помощью этой операции можно удалить одно или несколько загружений и групп нагрузок. Операции удаления выполняются в одноименном диалоговом окне (рис. 8.5-2), в список которого в зависимости от активного маркера попадают имена загружений или групп нагрузок.

Для выполнения операции следует отметить в списке удаляемые позиции и нажать кнопку **Удалить выбранные**. При этом из удаляемых загружений исключаются все заданные в них нагрузки, а загружения формально остаются. Это связано с возможными ссылками на эти загружения в исходных данных для вычисления расчетных сочетаний усилий, комбинаций загружений и др.

## Упаковка загружений



С помощью этой операции из проекта удаляются все загружения, в которых отсутствуют нагрузки.

После упаковки загружений необходимо проверить исходные данные для вычисления РСУ и комбинаций загружений (главы 18 и 17), т.к. могут быть нарушены логические связи между загружениями.

## 8.6. Подготовка данных для расчета на динамические воздействия

В отличие от расчета на статические воздействия, исходные данные для расчета на динамические воздействия включают характеристики выбранного воздействия, а также описание динамических нагрузок, порождающих колебания системы.

Динамические загружения должны учитывать инерционные силы. Эти силы связаны с узловыми массами и массами, расположенными на элементах системы. Задание масс возможно как явно, аналогично статическим нагрузкам, так и путем ссылки на статические загружения. Все нагрузки таких загружений (действующие по направлению оси Z общей системы координат) с учетом коэффициентов, заданных для каждого загружения, интерпретируются как веса масс, приведенные к узлам системы. При этом в одном динамическом загружении могут одновременно использоваться различные способы описания масс. Таким образом, для динамических загружений могут использоваться три вида данных, необходимых для выполнения расчета: характеристики загружения, описание нагрузки и описание масс. Для некоторых видов динамических воздействий, например, сейсмических, нагрузка не задается. В то же время, воздействия типа импульсных, ударных и ряда других требуют задания соответствующих нагрузок.

При анализе систем допускается использование различных инерционных характеристик в разных загружениях (например, исследуется движение системы с учетом временных нагрузок и движение той же системы без временных нагрузок).

В программе реализован расчет на следующие виды динамических воздействий:

– *сейсмические воздействия в соответствии с рекомендациями нормативных документов:*

- СНиП II-7-81* — Российская Федерация;
- СНиП II-7-81* — с изменениями от 01.01.2000 г. Российская Федерация;
- СП 31-114-2004 — Российская Федерация;
- СП 14.13330.2011 — Российская Федерация;
- СП 14.13330.2014 — Российская Федерация;
- СП 14.13330.2018 — Российская Федерация;
- СП 14.13330.2018 с изменением № 1 — Российская Федерация;
- МГСН 4.04-94 — г. Москва, Российская Федерация;
- НП 031-01 — (нормы проектирования сейсмостойких АЭС) Российская Федерация;
- ДБН В.1.1.-12-2006 — Украина;
- ДБН В.1.1.-12-2014 — Украина;
- СНиП В.1.2-4-98 — Республика Казахстан;
- СНиП РК 2.03-30-2006 — Республика Казахстан;
- СП РК 2.03-30-2017 — Республика Казахстан;
- НТП РК 08-01.1-2017 — Республика Казахстан;
- СНРА II-2.02.94 — Республика Армения;
- СНРА II-6.02.2006 — Республика Армения;
- СНТ 2.01.08-99 — Туркменистан;
- Az. DTN 2.3-1 — Республика Азербайджан;
- КМК 2.01.03-96 — Республика Узбекистан;
- КМК 2.01.03-19 — Республика Узбекистан;
- СНиП КР 20-02:2009 — Кыргызская Республика;
- ГНиП РТ 22-07-2015 — Республика Таджикистан;
- ГНиП РТ 22-07-2018 — Республика Таджикистан;
- СП 358.1325800.2017— Российская Федерация;
- нормы СНГ (проект);
- EN 1998 — Евросоюз;

– *сейсмические воздействия, задаваемые через акселерограммы или графики динамичности;*

- однокомпонентная акселерограмма;
- трехкомпонентная акселерограмма;

- шестикомпонентное воздействие;

– *ветровые воздействия в соответствии с рекомендациями нормативных документов:*

- СНиП 2.01.07-85* — Российская Федерация;
- СНиП 2.01.07-85* (СП 20.13330.2011, СП 20.13330.2016) — Российская Федерация;
- МГСН 4.04-94 — г. Москва, Российская Федерация;

– *прочие воздействия:*

- импульс;
- импульс с отслеживанием истории;
- удар;
- удар с отслеживанием истории;
- удар с учетом влияния массы ударяемого тела;
- гармонические колебания с учетом пусковых резонансов;
- гармонические колебания (расчет на фиксированную частоту);
- гармонические колебания (с учетом возможной ошибки в определении собственных частот);
- модальный анализ;
- прямое интегрирование уравнений движения.

Учитываемое направление действия инерционных сил (направление узловых масс), должно соответствовать поступательным динамическим степеням свободы, определяемым граничными условиями и признаком схемы. Следует заметить, что система допускает возможность пренебречь некоторыми инерционными силами, для чего указываются только те «направления масс», которые следует учитывать в расчете. Массы на элементах задаются в том же виде, что и распределенные и сосредоточенные нагрузки.

Рекомендуется следующий порядок действий при подготовке динамических загружений:

– в инструментальной панели **Загружения** активировать операцию **Динамические воздействия** и выбрать в выпадающем меню раздел **Создание нового загружения**;

– в появившемся диалоговом окне **Параметры динамических воздействий** назначить вид и параметры воздействия и выйти из окна нажатием кнопки **ОК**, после чего будет автоматически создано новое загружение;

– если для анализа воздействия требуется задание динамических нагрузок (например, для ударного воздействия), то следует активировать операцию **Параметры динамических нагрузок**, задать в одноименном окне соответствующие динамическому воздействию параметры нагрузки и после выхода из окна указать места приложения нагрузки на расчетной схеме (после выполнения перечисленных действий загружение необходимо сохранить);

– в случае «ручного» задания масс их описание выполняется в диалоговом окне **Массы**, которое появляется после активации операции **Инерционные характеристики**; после выхода из окна массы необходимо привязать к узлам и/или элементам схемы.

В таблице 8.6-1 приведен перечень реализованных в настоящее время видов динамических воздействий. В таблице приводится *Номер модуля* с внутренней идентификацией вида воздействия. В некоторых случаях этот внутренний номер может появляться в диагностических сообщениях. В последнем столбце указаны используемые правила суммирования усилий, условные обозначения для которых расшифрованы в таблице 8.6-2. Для некоторых типов воздействий указано несколько правил, которые могут использоваться в зависимости от выбранных пользователем опций.

**Таблица 8.6-1. Виды динамики**

| Динамические воздействия | Номер модуля | Нормативный документ | Название/Назначение | Правило суммирования |
|---|---|---|---|---|
| Сейсмические воздействия | 20 | СНиП II-7-81* | Строительство в сейсмических районах | SRSS |
| | 50 | Проект для СНГ | Строительство в сейсмических районах | |
| | 40 | СНиП II.7-81* | Строительство в сейсмических | |

| Динамические воздействия | Номер модуля | Нормативный документ | Название/Назначение | Правило суммирования |
|---|---|---|---|---|
| | | (01.01.2000) | районах | |
| | 54 | СП 31-114-2004 | Правила проектирования жилых и общественных зданий для строительства в сейсмических районах | SRSS<br>M10% |
| | 57 | СП 14.13330.2011 | Строительство в сейсмических районах (Актуализированная редакция СНиП II-7-81*) | |
| | 61 | СП 14.13330.2014 | Строительство в сейсмических районах (Актуализированная редакция СНиП II-7-81*) | |
| | 68 | СП 14.13330.2018 | Строительство в сейсмических районах (Актуализированная редакция СНиП II-7-81*) | |
| | 56 | МГСН 4.19.05 | МГСН | SRSS |
| | 51 | НП-031-01 | Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций | SRSS<br>M10% |
| | 53 | ДБН В.1.1-12:2006 | Строительство в сейсмических районах Украины | CQC |
| | 63 | ДБН В.1.1-12:2014 | Строительство в сейсмических районах Украины | |
| | 30 | СНиП В.1.2-4-98 (Республика Казахстан) | Строительство в сейсмических районах | SRSS |
| | 55 | СНиП РК 2.03-30-2006 (Республика Казахстан) | Строительство в сейсмических районах. Нормы проектирования | |
| | 67 | СП РК 2.03-30-2017, СП РК 2.03-30-2017* (Республика Казахстан) | Строительство в сейсмических районах. Нормы проектирования | |
| | 52 | СНРА II-2.02.94 | Сейсмика. Строительные нормы республики Армения | CQC |
| | 59 | СНРА II-6.02.2006 | Сейсмика. Строительные нормы республики Армения | |
| | 60 | AzDTN 2.3-1 (Республика Азербайджан) | Строительство в сейсмических районах | SRSS |
| | 62 | СНТ 2.01.08-99 (Туркменистан) | Строительство в сейсмических районах | M10% |
| | 64 | КМК 2.01.03-96 (Узбекистан) | Строительство в сейсмических районах | |
| | 65 | СНиП КР 20-02:2009 (Киргизия) | Сейсмостойкое строительство | SRSS |
| | 66 | СНТ 2.01.08-99* (Туркменистан) | Строительство в сейсмических районах | M10% |
| | 69 | ГНиП РТ 22-07-2015 ГНиП РТ 22-07-2018 (Таджикистан) | Сейсмостойкое строительство | SRSS |
| | 70 | СП 358.1325800.2017 | Сооружения гидротехнические | SRSS |
| | 71 | EN 1998 | Проектирование сейсмостойких конструкций | DSM+SRSS<br>DSM+Newmark(0.3)<br>DSM+Newmark(0.4)<br>SRSS+Newmark(0.3)<br>SRSS+Newmark(0.4)<br>CQC+SRSS<br>CQC+Newmark(0.3)<br>CQC+Newmark(0.4)<br>SRSS |
| | 72 | СП 14.13330.2018 с изменением № 1 | Строительство в сейсмических районах (Актуализированная редакция СНиП II-7-81*) | SRSS<br>CQC |
| | 73 | НТП РК 08-01.1-2017 | Проектирование сейсмостойких зданий и сооружений | SRSS |
| | 74 | КМК 2.01.03-19 | Строительство в сейсмических | M10% |

| Динамические воздействия | Номер модуля | Нормативный документ | Название/Назначение | Правило суммирования |
|---|---|---|---|---|
| | | (Узбекистан) | районах | |
| | 27 | | Сейсмика по акселерограмме | ENV |
| | 47 | | Сейсмика по акселерограммам (3 компоненты) | |
| | 58 | | Шестикомпонентное воздействие | SRSS<br>M10%<br>CQC |
| Пульсация ветрового потока | 21 | СНиП 2.01.07-85* | Нагрузки и воздействия | SRSS |
| | 31 | МГСН 4.19-05 | Многофункциональные высотные здания и комплексы | CQC |
| | 32 | СП 20.13330.2011, СП 20.13330.2016 | Нагрузки и воздействия (Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*) | SRSS |
| Импульс | 22 | | Импульс | SD |
| | 42 | | Импульс с отслеживанием истории | |
| Удар | 23 | | Удар | |
| | 43 | | Удар с отслеживанием истории | |
| | 33 | | Удар с учетом влияния массы ударяющего тела | SRRI |
| Гармонические колебания | 24 | | Расчет с учетом пусковых резонансов | |
| | 28 | | Расчет на фиксированную частоту | |
| | 34 | | Расчет на фиксированную частоту с учетом возможной ошибки в определении собственных частот | |
| Модальный анализ | 100 | | Модальный анализ | |
| Прямое интегрирование уравнений движения | 101 | | Прямое интегрирование уравнений движения | ENV |

Таблица 8.6-2. Правила суммирования

| Условное обозначение правила суммирования | Наименование |
|---|---|
| SRSS | Корень квадратный из суммы квадратов составляющих |
| CQC | Метод полного квадратичного объединения [6] |
| M10% | Суммирование с учетом близости частот (правило 10%) |
| SRRI | Корень квадратный из суммы квадратов действительной и мнимой составляющих |
| SD | Суммирование с учетом затухания |
| ENV | Огибающая (по времени) вычисленных значений. При вычислении расчетных сочетаний напряженные состояния, которые соответствуют различным моментам времени одного загружения считаются взаимоисключающими. |
| DSM | Метод двойных сумм [6] |
| GRP | Метод группировки [6] |
| Newmark(λ) | ±X±λY±λZ<br>±λX±Y±λZ<br>±λX±λY±Z |

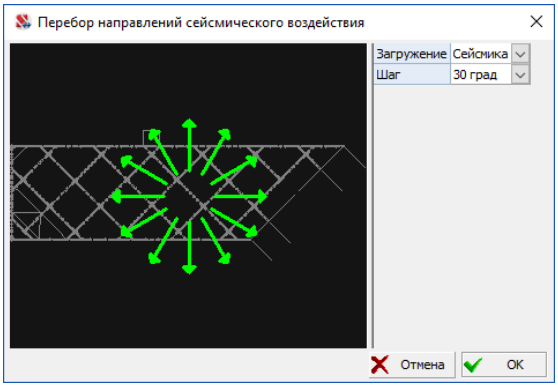
## 8.7. Назначение параметров динамических воздействий

Для назначения параметров динамических воздействий используется операция **Динамические воздействия**, которая вызывается из инструментальной панели **Загружения** нажатием одноименной кнопки  . При этом, если создается первое динамическое загружение, то появляется диалоговое окно **Параметры динамических воздействий**, в котором выполняется задание параметров. В противном случае открывается выпадающее меню, включающее два раздела.

Первый раздел — **Создание нового загружения** — используется в тех случаях, когда создается новое динамическое загружение, а второй — **Корректировка существующего загружения** — для внесения изменений в уже существующие динамические загружения.

Нормы строительства в сейсмических районах указывают, что сейсмическое воздействие может иметь любое направление, при этом наиболее опасное направление удается спрогнозировать лишь в простейших случаях. Для поиска опасного направления предлагались разные методики, например полагалось, что опасным является такое направление, при котором реализуется максимум потенциальной энергии деформаций. Нетрудно заметить, что при этом в системе могут присутствовать конструктивные элементы, запасающие относительно небольшой объем энергии деформаций, для которых опасным будет другое направление сейсмического воздействия.

В связи с указанным **SCAD** предусматривает возможность автоматического перебора возможных направлений, который реализуется с заданным угловым шагом. Если пользователем задано сейсмическое загружение, то в выпадающем меню появится третий пункт — **Перебор направлений сейсмического воздействия**, выбор которого приводит к появлению диалогового окна:




В этом окне можно выбрать сейсмическое загружение (если их создано несколько) и шаг по углу. После нажатия кнопки **OK**, создается некоторое число взаимоисключающих сейсмических нагружений с различными горизонтальными направлениями и далее, анализ расчетных сочетаний усилий выявит направления, опасные для разных элементов или частей конструкции.

## Создание нового загружения

После выбора в меню этого раздела появляется двухстраничное диалоговое окно **Параметры динамических воздействий** (рис. 8.7-1), на первой странице которого предусмотрено задание следующих данных:

- вид воздействия;
- имя загружения;
- признак преобразования статических нагрузок в массы и набор параметров преобразования;
- варианты реализации выбранного вида воздействия (таблица);
- метод определения собственных форм и частот.

Наименование и содержание второй страницы зависит от выбранного вида воздействия.

Рекомендуется следующий порядок действий при задании параметров динамического воздействия:

- ввести имя загружения в одноименную строку;
- с помощью маркеров назначить вид воздействия;
- если предполагается использовать автоматическое преобразование статических нагрузок в массы, то активировать одноименный маркер, после чего:
  - выбрать из выпадающего списка номер (имя) статического загружения;
  - в поле **Коэффициент пересчета** ввести значение коэффициента, на который будут умножаться его нагрузки при формировании масс;
  - нажать кнопку **Записать**;

  - повторить указанные действия для других загружений, участвующих в формировании масс;
  - для удаления загружения из сформированного списка достаточно выбрать в развернутом списке строку с этим загружением и нажать кнопку **Удалить**;
- указав курсором на соответствующую строку выбрать в таблице вариант реализации заданного динамического воздействия;
- с помощью маркеров задать метод определения собственных форм и частот (в случае выбора метода Ланцоша, назначить дополнительные параметры, необходимые для использования метода);
- перейти на вторую страницу диалогового окна (после выбора вида динамического воздействия открывается доступ ко второй странице диалогового окна, на которой задаются параметры этого воздействия) и задать параметры, необходимые для расчета выбранного варианта реализации воздействия;
- выйти из диалогового окна нажатием кнопки **OK**.

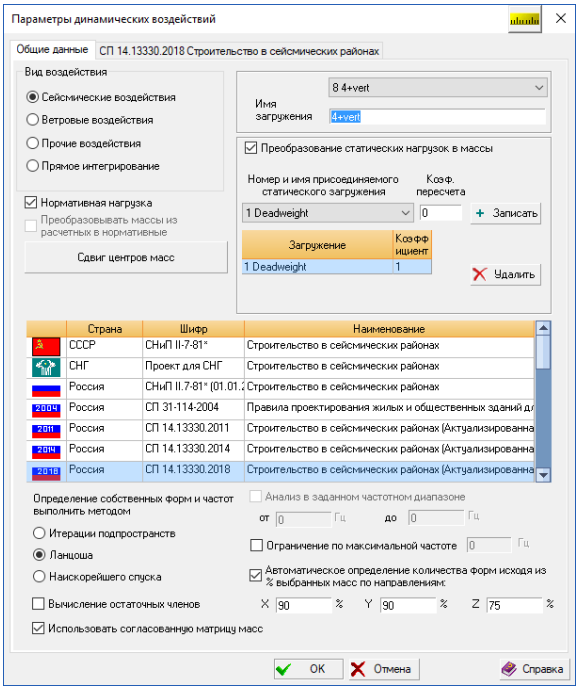



Рис. 8.7-1. *Диалоговое окно* **Параметры динамических воздействий**

Преобразование статических нагрузок в массы выполняется по следующим правилам:

- все местные нагрузки на элементы преобразуются в узловые нагрузки;
- из полученных таким образом узловых сил остаются нагрузки, действующие по направлению оси Z (они учитываются как массы по всем линейным степеням свободы схемы);
- знак вычисленной нагрузки игнорируется.

Заметим, что деление веса массы (статическое загружение) на ускорение силы тяжести выполняется автоматически и коэффициент пересчета здесь не играет никакой роли. Его используют для других целей, например, в случае задания расчетных значений статических нагрузок для вычисления нормативных значений масс.

Если активировать маркер **Нормативная нагрузка,** то тем самымс указывается, что значения нагрузок являются нормативными, а не расчетными.

Маркер **Преобразовывать массы из расчетных в нормативные** дублирует информацию, которая задается в параметрах расчета динамики (см. главу 11) и приведен здесь в информативных целях (если в качестве нормативного документа по вычислению комбинаций нагрузок выбран EN 1990, то данный элемент управления отсутствует).

Расчет на сейсмику в **SCAD** позволяет определить инерционные характеристики системы путем пересчета статических нагрузок. При этом следует иметь в виду несколько обстоятельств:

a) Не всякая статическая нагрузка имеет массу. Например, статическое давление газа не следует пересчитывать в массу поскольку это противоречит физическому смыслу такого нагружения (оно не создает инерционную силу, когда в системе реализуется некоторое ускорение).
b) Если значение нагрузки от собственного веса определено автоматически, то учтен вес только несущего каркаса. Но даже для него может оказаться, что следует использовать несколько увеличенное значение, которое при ручном расчете находилось через конструктивный коэффициент веса (вес узловых соединений, вес огнезащиты и т.п.). Для этого следует ввести соответствующий коэффициент увеличения веса.
c) Сейсмический СНиП (см., например, таблицу 2 СП 14.13330.2011) предусматривает, что в расчетное сочетание войдут не полные значения некоторых нагрузок, а умноженные на коэффициенты сочетаний:
   - вес конструкций — 0,90;
   - значения временных длительно действующих нагрузок — 0,80;
   - значения кратковременных временных нагрузок — 0,50.

Не вызывает сомнений использование этих коэффициентов применительно к постоянным нагрузкам. Ведь если мы полагаем, что сами нагрузки учитываются с уменьшением (практически вместо расчетного значения используется нормативное значение), то естественно и инерционную составляющую учитывать таким же образом.

А вот временные нагрузки нужно превращать в массы более осторожно. Дело в том, что создав соответствующую массу и засчитав таким образом инерционную составляющую от этой массы, мы можем попасть в ситуацию, когда при выборе РСУ такая нагрузка не попадёт в сочетание. Поэтому при значительном значении временной нагрузки нужно создать несколько взаимоисключающих вариантов сейсмического расчета. Например, вариант «пустой силос» без нагрузки от засыпки, и вариант «заполненный силос».

Следует также помнить, что игнорирование какой-то нагрузки при преобразовании ее в массы ведет к уменьшению периодов собственных колебаний. Что для абсолютного большинства конструкций, имеющих период собственных колебаний больший чем 0,1 с, увеличивает спектральный коэффициент динамичности β, и это обстоятельство идет в запас надежности.

Если новое загружение по большинству параметров совпадает с ранее заданным, то можно воспользоваться операцией **Значение параметров взять из загружения**. В этом случае новое загружение получит параметры динамического загружения, выбранного из списка, после чего необходимые параметры могут быть откорректированы.

Определение собственных форм и частот может быть выполнено различными методами: итерации подпространств, наискорейшего спуска или Ланцоша. Выбор метода осуществляется с помощью соответствующих маркеров. При этом метод Ланцоша позволяет в зависимости от вида решаемой задачи назначить диапазон частот, в котором выполняется анализ, или использовать режим автоматического определения необходимого количества форм собственных колебаний в зависимости от заданного процента выбора модальных масс (без учета масс в связях) по каждому из направлений (для расчета на сейсмические воздействия). Заметим, что метод Ланцоша можно использовать только совместно с многофронтальным или PARFES процессорами.

Выбор процента модальной массы определяется следующим рассуждением. Если конструкция была бы бесконечно жесткой, то под действием заданного ускорения основания ***a*** можно легко вычислить значение кинетической энергии $K=a^2M/2$, которая бы возникала в процессе движения ее массы $M$. Если определять потенциальную энергию для каждой формы собственных колебаний, то сумма таких энергий должна равняться величине $K$, а для неполного ряда собственных форм — некоторой доле $K$. Нормы проектирования некоторых стран (США, Франция) рекомендуют назначать долю выбранной модальной массы в размере 90% для горизонтального и 75% — для вертикального направлений. Эти величины принимаются по умолчанию. Значения диапазона

частот или процент модальных масс задаются в соответствующих полях ввода, которые открываются после активации одноименных маркеров.

Если используется метод Ланцоша, то программа предоставляет дополнительную возможность — автоматического выбора количества форм собственных колебаний, исходя из ограничений по частоте (будут выбраны все формы, частоты которых лежат в интервале от нуля до заданного пользователем числа). Если заданы как ограничения по частоте, так и ограничения по проценту модальных масс, то будут использованы оба условия.

Если выбран метод наискорейшего спуска или метод Ланцоша, то можно использовать либо диагональную либо согласованную матрицу масс (маркер **Использовать согласованную матрицу масс**).

### Корректировка параметров существующего загружения

Если в меню операции **Динамические воздействия** выбран раздел корректировки, то диалоговое окно **Параметры динамических воздействий** будет дополнительно включать выпадающий список ранее заданных динамических загружений (рис. 8.7-2). После выбора из списка корректируемого загружения автоматически восстанавливаются его параметры. В процессе корректировки допускается вносить изменения в несколько загружений, последовательно выбирая их из списка.

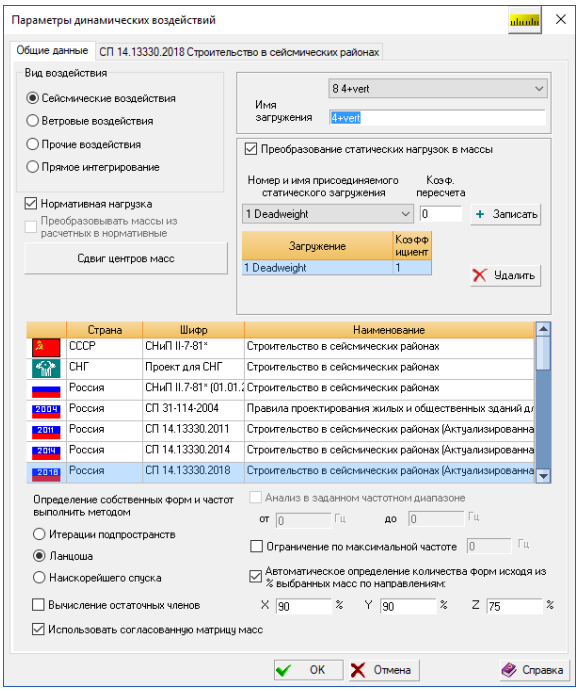



Рис. 8.7-2. *Диалоговое окно* **Параметры динамических воздействий** (операция корректировки)

Контроль и фиксация всей введенной информации выполняется при выходе из диалогового окна нажатием кнопки **ОК**. Если контроль обнаруживает ошибки в заданных параметрах, то выводится окно предупреждений.

**Если в режиме корректировки для выхода из окна воспользоваться кнопкой ОК, то независимо от того вносились изменения в данные или нет, проект будет считаться модифицированным и потребуется пересчет задачи.**

### Особенности задания данных сейсмических воздействий

***Поправочный коэффициент*** задается в данных всех сейсмических загружений для корректировки исходных данных, если имеется необходимость полнее учесть требования норм. Этот коэффициент может принимать любое положительное значение, и на него умножаются результаты расчета

инерционных сил от сейсмического воздействия. В качестве примеров можно рассмотреть следующие случаи использования значения поправочного коэффициента, отличного от единицы:

- категория грунта требует изменения сейсмичности площадки (например, уменьшения ее на один балл), что приводит к необходимости задания 6-балльной сейсмики (см., например, таблицу 1 СП 14.13330.2014). Учитывая то, что повышение сейсмичности на 1 балл приводит к удвоению результата, можно указать сейсмичность площадки как 7-балльную и задать значение поправочного коэффициента равным 0,5;
- необходимо проверить расчетом реально существующую конструкцию на воздействие землетрясения интенсивностью 8,5 баллов. Достаточно указать сейсмичность площадки в 8 баллов и задать значение поправочного коэффициента равным $2^{0,5}$ = 1,414, т.к. значение ускорения грунта вычисляется по формуле $K*2^N$ и $(K*2^{8,5})/(K*2^8)$ = 1,414.

***Требование об учете крутящего сейсмического момента*** в актуализированной редакции российских норм «Строительство в сейсмических районах» (СП 14.13330.2014) формулируется следующим образом:

> *«5.16 При расчете зданий и сооружений длиной или шириной более 30 м по консольной РДМ помимо сейсмической нагрузки, определяемой по 5.5, необходимо учитывать крутящий момент относительно вертикальной оси здания или сооружения, проходящей через его центр жесткости. Значение расчетного эксцентриситета между центрами жесткостей и масс зданий или сооружений в рассматриваемом уровне следует принимать не менее 0,1B , где B – размер здания или сооружения в плане в направлении, перпендикулярном к действию силы $S_k$».*

Аналогичные требования имеются в нормах Украины — ДБН В.1.1-12:2006, Казахстана — РК 2.03-30-2006 и ряда других стран.

При использовании **SCAD** обычно применяются расчетные динамические модели (РДМ) плоского или пространственного типов и указанная рекомендация, относящаяся к консольным РДМ теряет свою силу. Однако расчет на условный крутящий момент может потребоваться в тех случаях, когда регулярная конструктивная схема под действием сейсмики претерпевает только поступательные перемещения.

Типичным примером может служить каркас с рядами одинаковых поперечных рам, которые синхронно изгибаются и все диски перекрытий получают линейные смещения.

Если рассчитываемый объект именно таков и закручивание дисков перекрытий нет, то рекомендуется искусственно ввести несимметрию в схему. Это можно сделать, взяв собственный вес (следовательно, и массу) в одной половине здания с коэффициентом надежности по нагрузке, а в другой половине — без этого коэффициента. Тогда появится естественное закручивание и не потребуется использовать рекомендацию п. 5.15 СНиП.

Можно также использовать описанное ниже смещение центров масс этажей.

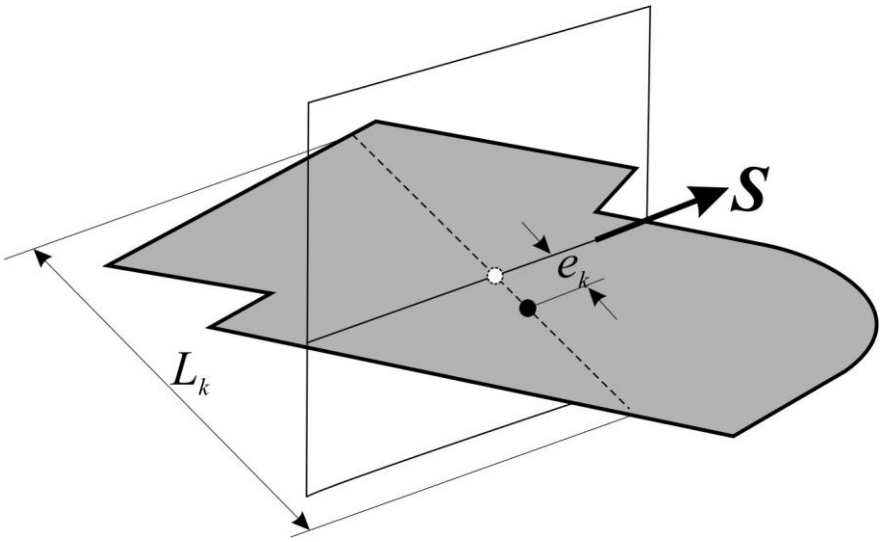
***Сдвиг центров масс***

Реальное сейсмическое воздействие отличается тем, что ускорения грунтового основания под сооружением не являются строго синхронными, и за счет этой неравномерности могут проявляться эффекты закручивания сооружения.

Для учета пространственных изменений движения грунта и погрешностей, возможных при определении центра масс, в Еврокоде и в нормах республики Казахстан предлагается расчетный центр масс на каждом этаже сместить от своего номинального положения на величину случайного эксцентриситета:

$$e_k=L_k h_{ek}, \quad h_{ek}=\pm 0{,}05 f_{ek}$$

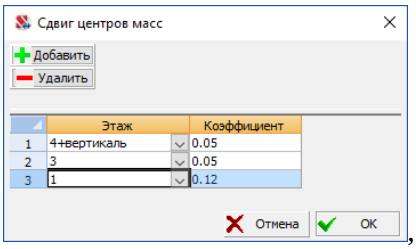
где $L_k$ – размер перекрытия, перпендикулярного к направлению действия сейсмической нагрузки, $f_{ek}$ – коэффициент, учитывающий нерегулярность здания в уровне $k$-го этажа (указан в нормах Казахстана).




Для сдвижки центра масс относительно вертикальной плоскости, проходящей через центр масс и параллельной заданному направлению сейсмического воздействия **S**, используется прием увеличения масс с одной стороны и уменьшения с другой таким способом, чтобы суммарная масса оставалась неизменной. При этом для каждого этажа рассматриваются массы, расположенные в уровне его перекрытия, поскольку именно здесь находятся основные нагрузки, обладающие массой (собственный вес и все полезные).

При заданном направлении сейсмического воздействия размер $L_k$ определяется автоматически как расстояние между наиболее удаленными друг от друга узлами, в которых имеются приведенные массы. Поэтому в расчетной схеме в виде консольного стержня с единственной массой на этаже $L_k$=0, и никакого смещения не будет.

Для задания данных о смещении центров масс этажей следует воспользоваться одноименной кнопкой (предполагается, что предварительно созданы группы элементов, которые соответствуют различным этажам). Нажатие кнопки приводит к появлению диалогового окна




, в котором с помощью кнопок **Добавить** и **Удалить** можно создать таблицу с данными о требуемых сдвигах центров масс. В первом столбце этой таблицы из списка имеющихся групп элементов выбирается нужная группа (этаж), а во втором столбце следует задать описанный выше коэффициент $h_{ek}$.

Сдвиг центров масс выполняется только для тех загружений, в которых учитывается (задано) направление воздействия или задано направление сдвига центра масс (например для случая EN 1998).

***Число учитываемых форм*** задается во всех диалогах. Однако если заданы проценты модальных масс, которые необходимо достигнуть для каждого направления, и выбран метод Ланцоша вычисления собственных чисел и форм колебаний, то будет найдено *не меньше* заданного числа форм.

***Учет вертикальной составляющей сейсмической нагрузки*** требуется для ряда случаев сейсмической нагрузки. Но она не может быть учтена автоматически, поскольку в описании расчетной схемы, принятом в комплексе **SCAD** и многих других программах, использующих метод конечных элементов, отсутствуют такие понятия, как «горизонтальная или наклонная консольная

конструкция», «пролетное строение моста» или «…пролет более 24 метров». Эти и другие случаи рассчитываются на действие вертикальной сейсмической нагрузки, если при задании исходных данных указать ее направление вдоль оси Z.

***Расчетные значения НДС***, например, в соответствии с формулой (8) СП 14.13330.2014, компоненты сейсмической реакции вычисляются как корень квадратный из суммы квадратов значений, соответствующих различным формам собственных колебаний. Это нелинейное преобразование (оценка Розенблюма) приводит к тому, что перемещения и внутренние усилия не соответствуют друг другу и не удовлетворяют условиям равновесия, поскольку для разных форм собственных колебаний они реализуются в различные моменты времени. Этот факт следует учитывать при анализе результатов расчета. Соответствие указанных компонентов гарантируется лишь для каждой формы в отдельности.

При расчете симметричных в плане конструкций может возникнуть ситуация, когда появляются перемещения (и соответствующие им усилия) не только по направлению действия сейсмической силы, но и в ортогональном направлении, хотя, исходя из условий симметрии, этого, казалось бы, не должно быть. Происходит это вследствие реализации формулировок норм, что можно показать на простейшем примере.

***Пример***. Пусть вертикально стоящая консоль с массой на вершине имеет формы колебаний (векторы записаны в строку) $f_1(1)=\{1; 0\}$ и $f_2(1)=\{0; 1\}$. Тогда при направляющих косинусах {1; 0} мы получим полный учет первой формы, а вторая форма не сработает, и ответ в некоторых условных единицах будет {1; 0}. Но, если эта же пара кратных форм определится как $f_1(2)=\{0{,}707; 0{,}707\}$ и $f_2(2)=\{0{,}707; -0{,}707\}$, то мы получим ответ {1; 1}. Разнозначные компоненты не уничтожат друг друга, так как суммируются квадраты (!) компонент и затем извлекается корень из суммы.

Остается только заметить, что для кратных собственных значений, характерных для симметричных конструкций, когда все направления равноправны, решение $f_1(1)$, $f_2(1)$ и решение $f_1(2)$, $f_2(2)$ абсолютно равноправны. Какое из них выберет программа (любая, а не только **SCAD**), определяется такими неуправляемыми деталями, как ошибки округления чисел с плавающей запятой.

Проблема исчезает при расчете по акселерограммам, поскольку там нет операции «корень из суммы квадратов».

***Учет близости частот.*** Например, в соответствии с формулой (9) СП 14.13330.2014 компоненты сейсмической реакции необходимо вычислять с учетом взаимной корреляции близких частот. При расчете по некоторым нормативным документам можно выбрать способ корреляции, если разрешено несколько вариантов.

***Вычисление остаточных членов.*** Данный маркер указывает программе на необходимость добавить к множеству собственных форм колебаний «остаточные формы», которые дополнят сумму модальных масс по соответствующим направлениям до 100%. Этим формам «приписывается» частота, равная частоте последней формы, которая определена на основании стандартного модального анализа. Здесь следует обратить внимание на то, что даже если не определено ни одной собственной пары, то остаточные формы все равно обеспечат 100% модальных масс (в нормативных документах вводится следующее требование: определенный процент модальных масс необходимо набрать «честно» и только остаток разрешается покрыть за счет остаточных форм). Предполагается, что взаимной корреляции остаточных форм нет.

***Графики коэффициентов динамичности*** — некоторые нормы допускают использование специальных форм графика (спектра) коэффициентов динамичности. График может быть задан в виде кусочно-линейной функции и сохраняться в файле с расширением **.spd**. Кроме единого графика предусмотрена возможность задания до шести графиков — отдельно для каждого направления воздействия.

Ниже приведен формат файла с описанием графика коэффициентов динамичности. Аналогичный по формату файл может быть получен с использованием программы-сателлита **Редактор графика коэффициентов динамичности**, входящей в комплект поставки системы **SCAD Office** (см. раздел 0). Если файл с графиком выбран, то кнопка  , позволяет вызвать **Редактор графика коэффициентов динамичности** для просмотра графика.

```
Спектр коэффициентов динамичности
#
0.030  1.030  0.060  1.45  0.100  2.500  0.147  3.100
0.202  2.820  0.261  2.64  0.359  2.560  0.464  2.030
0.681  1.400  1.000  1.06  1.565  0.650  0.966  0.390
```

До символа # идет комментарий, затем описываются вершины ломаной, аппроксимирующей график, где последовательно для каждой точки задаются период в секундах и значение соответствующего ему коэффициента.

***Файлы акселерограмм*** (расширение **.spc**) используются при расчетах по акселерограммах. Они должны находиться в том же каталоге, что и данные задачи. Вместе с комплексом поставляется несколько стандартных акселерограмм, которые находятся в каталоге программ. Приведем пример одной из них, имеющей имя 1m1-z.spc:

```
Расчетная акселерограмма в см/(с*с) для МРЗ  на площадке атомного реактора.
      Компонента  -  Z.  Модель - M1c. Amax =  42.2 см/(с*с).
      Количество точек N =  2047; Шаг по времени Dt =  0.05000 с.
#
0.01 2047 0.05
  0.0   0.0  -0.0  -0.3  -0.6  -0.4   0.8   1.8   1.9   0.3
 -1.6  -2.5  -3.5  -2.7  -1.7  -1.3   2.0   3.6   0.1  -0.6 ...
```

Ординаты акселерограммы могут быть заданы в любых единицах измерения. Первое число после символа # — коэффициент перевода используемых единиц, на который умножаются заданные значения для получения данных в м/с$^2$. В данном случае этот коэффициент равен 0,01. Затем следуют количество точек (2047), шаг по времени (0,05 сек) и последовательно значения ординат. В качестве разделителя целой и дробной частей используется десятичная точка. На странице предусмотрено задание масштабного множителя к ординатам акселерограммы.

Для упрощения процесса подготовки акселерограмм в **SCAD Office** включена специальная программа **Редактор Акселерограмм**, описание которой приведено в разделе 34.8. Если файл с акселерограммой выбран, то кнопка  , позволяет вызвать **Редактор Акселерограмм** для просмотра акселерограммы и ее параметров.

## Расчет на сейсмические воздействия согласно СНиП II-7-81*

Исходные данные задаются на одноименной странице (рис. 8.7-3) согласно СНиП II-7-81* Не останавливаясь подробно на каждом элементе управления этой страницы, сосредоточим внимание на тех вопросах, которые требуют дополнительных пояснений. При подготовке исходных данных следует обратить внимание на следующие факторы:

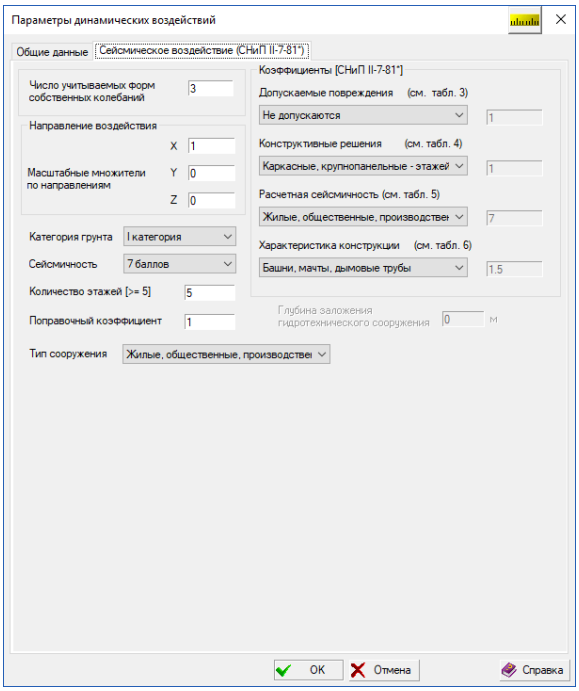



Рис. 8.7-3. *Страница* **Сейсмическое воздействие (СНиП II-7-81*)**

**Сейсмичность —** задается без учета категории грунта. Изменение сейсмичности в зависимости от категории грунта следует учесть при задании значения поправочного коэффициента.

**Поправочный коэффициент —** задается для корректировки исходных данных, если имеется необходимость полнее учесть требования СНиП. Этот коэффициент может принимать любое положительное значение, и на него умножаются результаты расчета инерционных сил от сейсмического воздействия.

**Направление воздействия** — задается масштабными множителями по отношению к осям общей системы координат.

Назначение коэффициентов, учитывающих допускаемые повреждения, конструктивные решения, расчетную сейсмичность и характеристики сооружения, выполняется путем выбора из списков в соответствии с указанными рядом со списками пунктами норм.

## Расчет на сейсмические воздействия согласно СНиП II-7-81* с учетом изменений от 27.12.99 г.

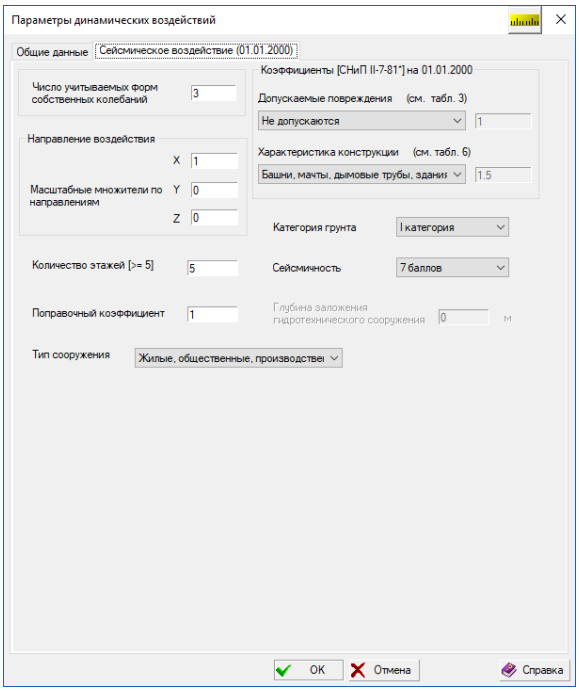



Рис. 8.7-4. *Страница* **Сейсмическое воздействие (**СНиП II-7-81* в редакции до 01.01.2000 г.)

При подготовке исходных данных следует обратить внимание на следующие факторы:

**Сейсмичность —** задается без учета категории грунта. Изменение сейсмичности в зависимости от категории грунта следует учесть при задании значения поправочного коэффициента.

**Поправочный коэффициент** — задается для корректировки результатов, если имеется необходимость полнее учесть требования СНиП. Этот коэффициент может принимать любое положительное значение, и на него умножаются результаты расчета инерционных сил от сейсмического воздействия.

**Направление воздействия** — задается масштабными множителями по отношению к осям общей системы координат.

Назначение коэффициентов, учитывающих допускаемые повреждения и характеристики сооружения, выполняется путем выбора из выпадающих списков в соответствии с указанными рядом со списками пунктами норм.

В программе реализован СНиП II-7-81* «Строительство в сейсмических районах» с учетом всех пяти изменений, внесенных в него постановлениями Госстроя СССР и России от 27.12.99 г. Для поддержки проектов, расчет которых проводился до внесения изменения, сохранен модуль, позволяющий производить расчет по СНиП в редакции до 01.01.2000 г.

Необходимо отметить, что изменение №5 было кардинальным. Оно внедрило комплекс новых карт сейсмического районирования территории России, которые реализуют различную вероятность возникновения расчетного землетрясения. Таким образом, для проектирования зданий и сооружений различной степени ответственности используются разные карты сейсмического районирования.

В связи с этим из основной расчетной формулы (1) СНиП II-7-81* исключен коэффициент $K_2$, что резко уменьшило количество расчетных градаций типов зданий и сооружений (с учетом того, что этот выбор реализуется уже после выбора карты районирования). Кроме этого, значительно изменены графики коэффициентов динамичности в сторону увеличения их значений практически во всем реальном диапазоне периодов собственных колебаний. Поэтому прямое сопоставление

результатов ранее сделанных расчетов с использованием только тех исходных данных, которые использовались в расчете по СНиП до принятия изменения №5, невозможно. Требуется задать новые исходные данные комплектно с учетом возможного изменения сейсмического района.

### Сейсмика по СП 31-114-2004 Российской Федерации

При подготовке исходных данных следует обратить внимание на следующие факторы:

**Сейсмичность** — задается без учета категории грунта. Изменение сейсмичности в зависимости от категории грунта следует учесть при задании значения поправочного коэффициента.

**Коэффициент учета неупругих деформаций** — учитывает неупругую работу конструкции и допускаемые повреждения в ней (берется из таблицы 3 СНиП II-7-81*).

**Поправочный коэффициент** — задается для корректировки результатов, если имеется необходимость полнее учесть требования СП. Этот коэффициент может принимать любое положительное значение, и на него умножаются результаты расчета инерционных сил от сейсмического воздействия.

**Направление вектора сейсмического воздействия** — определяется вектором, заданным в общей системе координат.

**Минимальный размер в плане** — используется при определении коэффициента, учитывающего спектр длин сейсмических волн (см. п. Б.2 Приложения Б).

**Учет крутильной компоненты** — если учитывается крутильная составляющая (активирован одноименный маркер), то необходимо задать координаты центра вращения и направление вектора крутильного воздействия.

**Координаты центра вращения** — в качестве координат центра вращения следует принимать координаты центра тяжести пятна основания здания, считая основание однородным по всей площади.

**Направление вектора крутильного воздействия** — задается вектором ротационного ускорения.

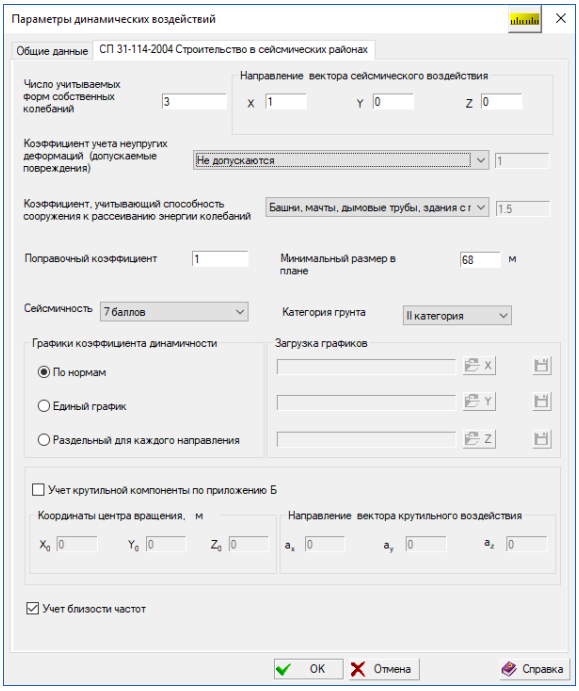



Рис. 8.7-5. *Страница* **СП 31-114-2004 Строительство в сейсмических районах**

**Учет близости частот** — если этот маркер активен, то для соседних тонов собственных колебаний, отличающихся менее чем на 10%, используется формула 6.4, позволяющая учесть взаимную корреляцию обобщенных координат.

**Графики коэффициентов динамичности** — рассматриваемые нормы допускают использование специальных форм графика (спектра) коэффициентов динамичности. График может быть задан в виде кусочно-линейной функции и сохраняться в файле с расширением **.spd**. График может быть получен с использованием программы-сателлита **Редактор графика коэффициентов динамичности**, входящей в комплект поставки системы **SCAD Office** (см. раздел 0). Если файл с графиком выбран, то кнопка  , позволяет вызвать **Редактор графика коэффициентов динамичности** для просмотра графика.

Кроме единого графика предусмотрена возможность задания трех графиков — отдельно для каждого направления воздействия. В зависимости от активного маркера может быть использован график, приведенный в нормах (маркер **По нормам**), загружен заранее подготовленный файл с единым графиком (маркер **Единый график**) или три файла с отдельными графиками для каждого направления (маркер **Раздельный для каждого направления**).

## Сейсмика по СП 14.13330.2011 (Актуализированная редакция СНиП II-7-81*) Российской Федерации

При подготовке исходных данных следует обратить внимание на следующие факторы:

**Число учитываемых форм собственных колебаний** — согласно данному нормативному документу минимальное количество учитываемых форм собственных колебаний назначается таким образом, чтобы «сумма эффективных модальных масс составляла не менее 90% общей массы системы, возбуждаемой по направлению сейсмического воздействия для горизонтальных воздействий и не менее 75% — для вертикального воздействия» (СП). Для автоматического определения необходимого количества форм собственных колебаний используется метод Ланцоша (только совместно с многофронтальным или PARFES процессорами).

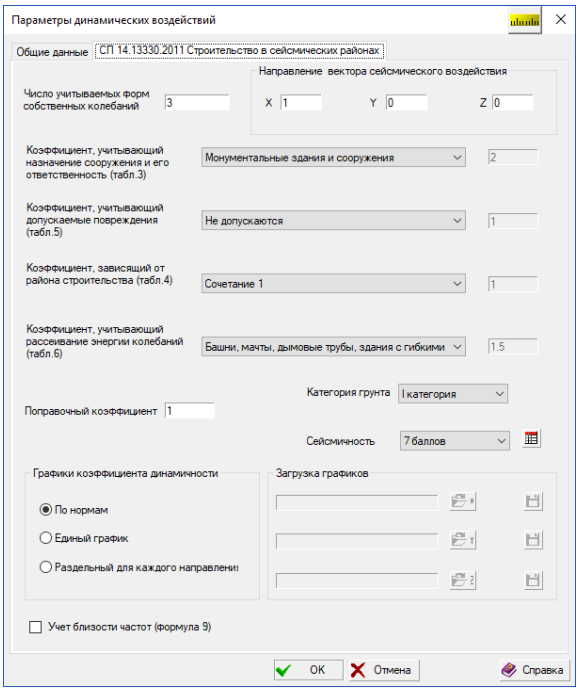



Рис. 8.7-6. *Страница* **СП 14.13330.2011 Строительство в сейсмических районах**

**Сейсмичность** — задается без учета категории грунта. ***Изменение сейсмичности в зависимости от категории грунта следует учесть при задании значения поправочного коэффициента***. Значение расчетной сейсмичности для конкретной местности может задаваться путем выбора из списка или обращением к операции **Выбор населенного пункта**, кнопка вызова которой  расположена справа от списка. В последнем случае открывается диалоговое окно со списком населенных пунктов, соответствующим Приложению А. После указания в списке на графу

со значением сейсмичности и нажатия кнопки **ОК** окно закрывается, и выбранное значение отображается в списке **Сейсмичность**.

**Коэффициент, учитывающий рассеивание энергии колебаний** — учитывает неупругую работу конструкции (берется из таблицы 6).

**Коэффициент, учитывающий назначение сооружения и его ответственность** — выбирается в соответствии с таблицей 3.

**Коэффициент, учитывающий допускаемые повреждения** — выбирается в соответствии с таблицей 5.

**Коэффициент, зависящий от района строительства** — выбирается в соответствии с таблицей 4.**Поправочный коэффициент** — задается для корректировки результатов, если имеется необходимость полнее учесть требования СНиП. Этот коэффициент может принимать любое положительное значение, и на него умножаются результаты расчета инерционных сил от сейсмического воздействия.

**Направление вектора сейсмического воздействия** — определяется вектором, заданным в общей системе координат.

**Учет близости частот** — если этот маркер активен, то для соседних тонов собственных колебаний, отличающихся менее чем на 10%, используется формула (9), позволяющая учесть взаимную корреляцию обобщенных координат.

**Графики коэффициентов динамичности** — в дополнение к спектрам графиков коэффициентов динамичности, приведенных в нормах, допускается использование специальных графиков, задаваемых в виде файла. Предусмотрено использование единого такого графика по всем трем направлениям, или разных для каждого направления воздействия. В зависимости от активного маркера может быть использован график норм (маркер **По нормам**), загружен заранее подготовленный файл с единым графиком (маркер **Единый график**) или три файла с отдельными графиками для каждого направления (маркер **Раздельный для каждого направления**). График может быть получен с использованием программы-сателлита **Редактор графика коэффициентов динамичности**, входящей в комплект поставки системы **SCAD Office** (см. раздел 0). Если файл с графиком выбран, то кнопка  , позволяет вызвать **Редактор графика коэффициентов динамичности** для просмотра графика.

## Сейсмика по МГСН 4.19-05

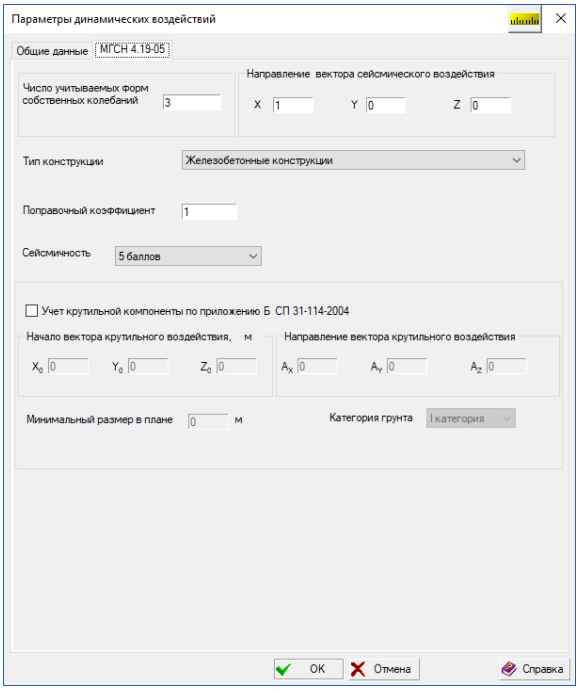



Рис. 8.7-7. *Страница* **МГСН 4.19-05**

При подготовке исходных данных следует обратить внимание на следующие факторы:

**Сейсмичность** — задается без учета категории грунта. ***Изменение сейсмичности в зависимости от категории грунта следует учесть при задании значения поправочного коэффициента***.

**Поправочный коэффициент** — задается для корректировки результатов, если имеется необходимость полнее учесть требования норм. Этот коэффициент может принимать любое положительное значение, и на него умножаются результаты расчета инерционных сил от сейсмического воздействия.

**Тип конструкции** — выбирается стальная или железобетонная конструкция.

**Направление вектора сейсмического воздействия** — определяется вектором, заданным в общей системе координат.

**Минимальный размер в плане** — используется при определении коэффициента, учитывающего спектр длин сейсмических волн (см. п. Б.2 Приложения Б).

**Учет крутильной компоненты** — если учитывается крутильная составляющая (активирован одноименный маркер), то необходимо задать координаты центра вращения и направление вектора крутильного воздействия (приложение Б. СП 31-114-2004).

**Координаты центра вращения** — в качестве координат центра вращения следует принимать координаты центра тяжести пятна основания здания, считая основание однородным по всей площади.

**Направление вектора крутильного воздействия** — задается вектором ротационного ускорения.

## Сейсмика по СП 14.13330.2014 и СП 14.13330.2018 (Актуализированная редакция СНиП II-7-81*) Российской Федерации

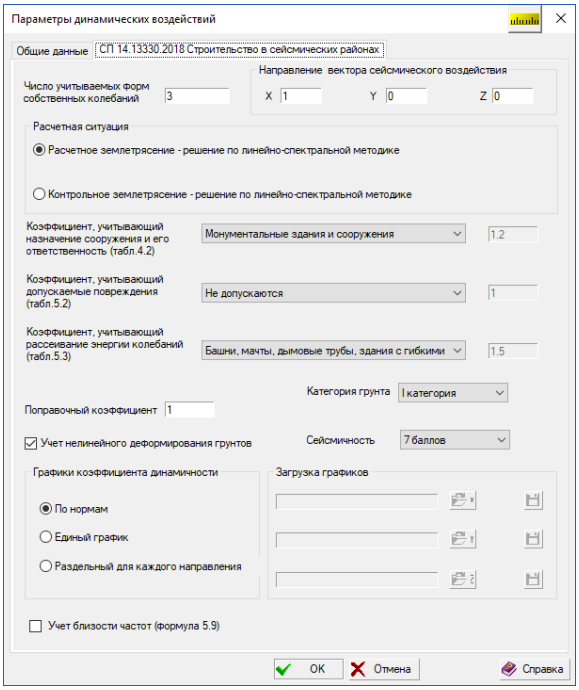



Рис. 8.7-8. *Страница*
**СП 14.13330.2014 Строительство в сейсмических районах**

При подготовке исходных данных следует обратить внимание на следующие факторы:

**Расчетная ситуация** — согласно СП 14.13330.2014 (СП 14.13330.2018) расчеты могут быть произведены для двух расчетных ситуаций (проектное/расчетное землетрясение или максимальное расчетное/контрольное землетрясение).

**Число учитываемых форм собственных колебаний** — согласно данному нормативному документу минимальное количество учитываемых форм собственных колебаний назначается таким

образом, чтобы «сумма эффективных модальных масс составляла не менее 90% общей массы системы, возбуждаемой по направлению действия сейсмического воздействия для горизонтальных воздействий и не менее 75% — для вертикального воздействия». Для автоматического определения необходимого количества форм собственных колебаний используется метод Ланцоша (только совместно с многофронтальным или PARFES процессорами).

**Сейсмичность** — задается без учета категории грунта. ***Изменение сейсмичности в зависимости от категории грунта следует учесть при задании значения поправочного коэффициента***.

**Коэффициент, учитывающий рассеивание энергии колебаний** — учитывает неупругую работу конструкции (берется из таблицы 5 СП 14.13330.2014 и таблицы 4.2 СП 14.13330.2018)

**Коэффициент, учитывающий назначение сооружения и его ответственность —** выбирается в соответствии с таблицей 3 СП 14.13330.2014 и таблицы 5.2 СП 14.13330.2018.

**Коэффициент, учитывающий допускаемые повреждения —** выбирается в соответствии с таблицей 4 СП 14.13330.2014 и таблицы 5.3 СП 14.13330.2018.

**Поправочный коэффициент** — задается для корректировки результатов, если имеется необходимость полнее учесть требования норм. Этот коэффициент может принимать любое положительное значение, и на него умножаются результаты расчета инерционных сил от сейсмического воздействия.

**Направление вектора сейсмического воздействия** — определяется вектором, заданным в общей системе координат.

**Учет близости частот** — если этот маркер активен, то для соседних тонов собственных колебаний, отличающихся менее чем на 10%, используется формула (9) СП 14.13330.2014 и формула (5.9) СП 14.13330.2018, позволяющая учесть взаимную корреляцию обобщенных координат.

**Графики коэффициентов динамичности** — в дополнение к спектрам графиков коэффициентов динамичности, приведенных в нормах, допускается использование специальных графиков, задаваемых в виде файла. Предусмотрено использование единого такого графика по всем трем направлениям, или разных для каждого направления воздействия. В зависимости от активного маркера может быть использован график норм (маркер **По нормам**), загружен заранее подготовленный файл с единым графиком (маркер **Единый график**) или три файла с отдельными графиками для каждого направления (маркер **Раздельный для каждого направления**). График может быть получен с использованием программы-сателлита **Редактор графика коэффициентов динамичности**, входящей в комплект поставки системы **SCAD Office** (см. раздел 0). Если файл с графиком выбран, то кнопка  , позволяет вызвать **Редактор графика коэффициентов динамичности** для просмотра графика.

**Учет нелинейного деформирования грунта** — если этот маркер активен, то при сейсмичности 8 баллов и более, повышенной только в связи с наличием грунтов категории III и IV, вводится понижающий множитель (см. примечания к формуле (2) СП 14.13330.2014 и (5.2) СП 14.13330.2018).

## Сейсмика по СП 14.13330.2018 с Изменением № 1 (Актуализированная редакция СНиП II-7-81*) Российской Федерации

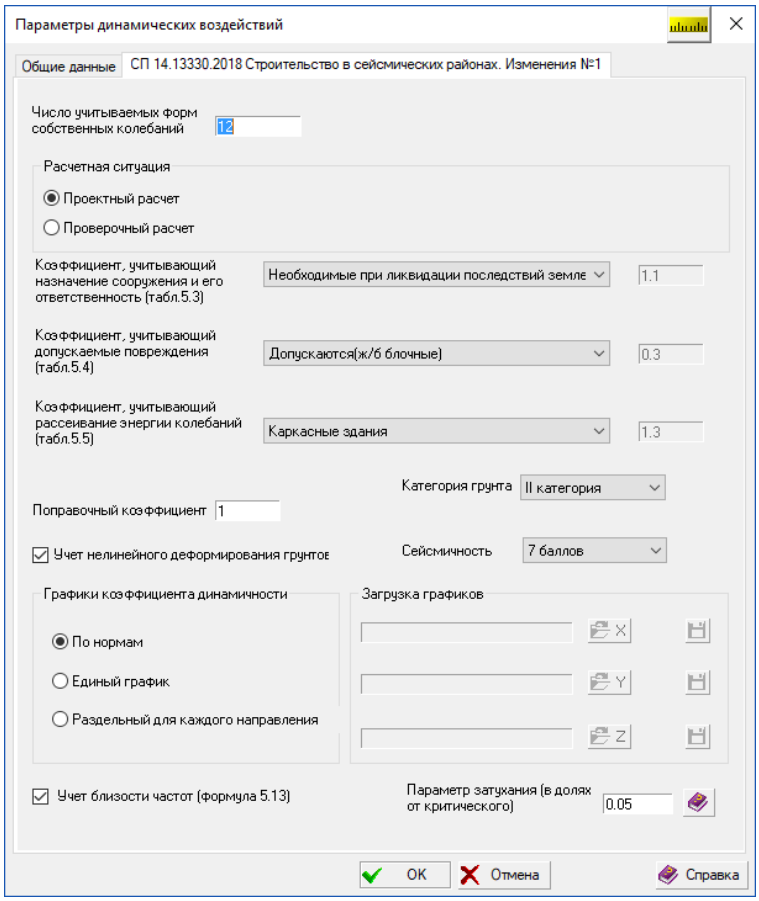



Рис. 8.7-9. *Страница*
**СП 14.13330.2018 с Изменением №1 “Строительство в сейсмических районах”**

При подготовке исходных данных следует обратить внимание на следующие факторы:

В данной редакции СП 14.1333.2018 наиболее опасное направление воздействия определяется автоматически.

**Число учитываемых форм собственных колебаний** — согласно данному нормативному документу «Минимальное число учитываемых в расчете форм собственных колебаний рекомендуется назначать так, чтобы сумма эффективных модальных масс составляла не менее 90 % общей массы системы». Для автоматического определения необходимого количества форм собственных колебаний используется метод Ланцоша (только совместно с многофронтальным или PARFES процессорами).

**Расчетная ситуация** — согласно **Изменения № 1** к **СП 14.13330.2018** расчеты могут быть произведены для двух расчетных ситуаций:

а) проектный расчет с применением линейно спектрального метода (ЛСМ) для получения данных для проектирования конструкции;

б) проверочный расчет в виде нелинейного динамического расчета во временно́й области.

**Коэффициент, учитывающий назначение сооружения и его ответственность —** выбирается в соответствии с таблицей 5.3 **Изменения № 1** к **СП 14.13330.2018**.

**Коэффициент, учитывающий допускаемые повреждения —** выбирается в соответствии с таблицей 5.4 **Изменения № 1** к **СП 14.13330.2018**.

**Коэффициент, учитывающий рассеивание энергии колебаний** — учитывает неупругую работу конструкции (берется из таблицы 5.5 **Изменения № 1** к **СП 14.13330.2018**)

**Поправочный коэффициент** — задается для корректировки результатов, если имеется необходимость полнее учесть требования норм. Этот коэффициент может принимать любое

положительное значение, и на него умножаются результаты расчета инерционных сил от сейсмического воздействия.

**Категория грунта** — выбирается из одноименного списка.

**Сейсмичность** — задается без учета категории грунта. ***Изменение сейсмичности в зависимости от категории грунта следует учесть при задании значения поправочного коэффициента***.

**Учет близости частот** — если этот маркер активен, то для соседних тонов собственных колебаний, отличающихся менее чем на 10%, используется формула (5.13) **Изменения № 1** к **СП 14.13330.2018**, позволяющая учесть взаимную корреляцию обобщенных координат.

**Графики коэффициентов динамичности** — в дополнение к спектрам графиков коэффициентов динамичности, приведенных в нормах, допускается использование специальных графиков, задаваемых в виде файла. Предусмотрено использование единого такого графика по всем трем направлениям, или разных для каждого направления воздействия. В зависимости от активного маркера может быть использован график норм (маркер **По нормам**), загружен заранее подготовленный файл с единым графиком (маркер **Единый график**) или три файла с отдельными графиками для каждого направления (маркер **Раздельный для каждого направления**). График может быть получен с использованием программы-сателлита **Редактор графика коэффициентов динамичности**, входящей в комплект поставки системы **SCAD Office** (см. раздел 0). Если файл с графиком выбран, то кнопка  , позволяет вызвать **Редактор графика коэффициентов динамичности** для просмотра графика.

**Учет нелинейного деформирования грунта** — если этот маркер активен, то при сейсмичности 8 баллов и более, повышенной только в связи с наличием грунтов категории III и IV, вводится понижающий множитель (см. примечания к п. 5.23).

**Параметр затухания (в долях от критического)** — задается в зависимости от материала сооружения и элементов сооружения. Справочные значения параметра для различных конструкций приведены в диалоговом окне **Справочные данные о внутреннем трении**, которое вызывается нажатием кнопки  .

### Расчет по нормам проектирования сейсмостойких атомных станций НП-031-01

При подготовке исходных данных следует обратить внимание на следующие факторы:

**Число учитываемых форм собственных колебаний** — в данном нормативном документе в явном виде отсутствует указание о минимально необходимом количестве учитываемых форм собственных колебаний. Однако, исходя из рекомендаций аналогичных нормативных документов и требований МАГАТЭ, рекомендуем количество форм назначать таким образом, чтобы «сумма эффективных модальных масс составляла не менее 90% общей массы системы, возбуждаемой по направлению действия сейсмического воздействия для горизонтальных воздействий и не менее 75% — для вертикального воздействия». Для автоматического определения необходимого количества форм собственных колебаний используется метод Ланцоша (только совместно с многофронтальным или PARFES процессорами).

**Направление воздействия** — определяется вектором, заданным в общей системе координат.

**Коэффициент, учитывающий особые условия эксплуатации конструкций АС** — значение назначается автоматически в зависимости от категории и назначения конструкции (выбирается в выпадающем списке). В случае выбора в списке графы **Другие** — коэффициент необходимо задать в соответствующем поле ввода.

**Максимальное ускорение грунта в горизонтальной плоскости** — принимается в зависимости от сейсмичности площадки (выбирается в выпадающем списке). В случае выбора в списке графы **Другие** — ускорение в указанных единицах измерения необходимо задать в соответствующем поле ввода.

**Коэффициент учета максимального ускорения грунта в направлении Z** — согласно п. 5 Приложения 3 данный коэффициент следует задавать равным 2/3.

**Логарифмический декремент колебаний** — параметр, определяющий затухание колебаний строительных конструкций и трубопроводов. Значение коэффициента вводится пользователем или

может быть определено с помощью операции  **Справочные данные о внутреннем трении** в одноименном диалоговом окне. Согласно п. 6 Приложения 3 данный коэффициент требуется только в том случае, когда используется график коэффициентов динамичности, приведенный в нормативном документе.

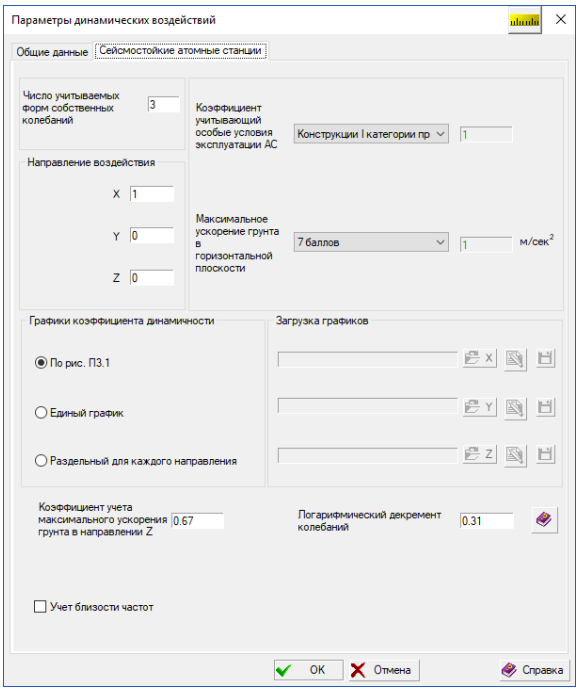



Рис. 8.7-10. *Страница* **Сейсмостойкие атомные станции**

**Графики коэффициентов динамичности** — в дополнение к спектрам графиков коэффициентов динамичности, приведенных в Приложении 3 (П.3.1) допускается использование специальных графиков, задаваемых в виде файла. Предусмотрено использование единого такого графика по всем трем направлениям, или разных для каждого направления воздействия. В зависимости от активного маркера может быть использован график норм (маркер **По рис. П3.1.**), загружен заранее подготовленный файл с единым графиком (маркер **Единый график**) или три файла с отдельными графиками для каждого направления (маркер **Раздельный для каждого направления**). График может быть получен с использованием программы-сателлита **Редактор графика коэффициентов динамичности**, входящей в комплект поставки системы **SCAD Office** (см. раздел 0). Если файл с графиком выбран, то кнопка  , позволяет вызвать **Редактор графика коэффициентов динамичности** для просмотра графика.

**Учет близости частот** — если этот маркер активен, то для соседних тонов собственных колебаний, отличающихся менее чем на 10%, используется формула, позволяющая учесть взаимную корреляцию обобщенных координат.

## Расчет на сейсмические воздействия по строительным нормам Украины ДБН В.1.1-12:2006

При подготовке исходных данных следует обратить внимание на следующие факторы:

**Число учитываемых форм собственных колебаний** — согласно данному нормативному документу минимальное количество учитываемых форм собственных колебаний назначается таким образом, чтобы сумма модальных масс составляла не менее 85% общей массы системы, возбуждаемой по направлению действия сейсмического воздействия для горизонтальных воздействий и не менее 75% — для вертикального воздействия. Для автоматического определения необходимого количества форм собственных колебаний используется метод Ланцоша (только совместно с многофронтальным или PARFES процессорами).

**Сейсмичность** — задается без учета категории грунта. ***Изменение сейсмичности в зависимости от категории грунта следует учесть при задании значения поправочного коэффициента***. Значение расчетной сейсмичности для конкретной местности может задаваться путем выбора из списка или обращением к операции **Выбор населенного пункта**, кнопка вызова которой  расположена справа от списка. В последнем случае открывается диалоговое окно со списком населенных пунктов, соответствующим Приложению А. После указания в списке на графу со значением сейсмичности и нажатия кнопки **ОК** окно закрывается и выбранное значение отображается в списке **Сейсмичность**.

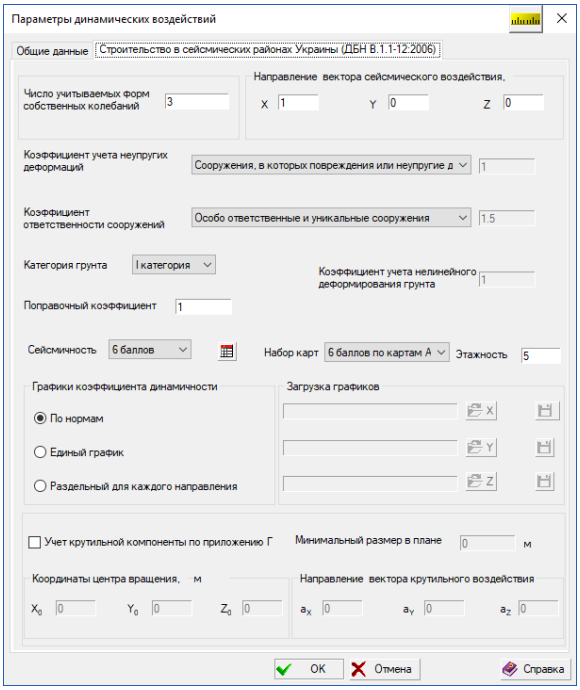



Рис. 8.7-11. *Страница* **Строительство в сейсмических районах Украины**

**Коэффициент учета неупругих деформаций** — учитывает неупругую работу конструкции и локальные повреждения в ней (берется из таблицы 2.3). Значение коэффициента зависит от сейсмичности площадки строительства.

**Коэффициент ответственности сооружений** — выбирается из списка, соответствующего таблице 2.4. В случае выбора в списке графы **Другие** — значение следует задать в поле ввода, расположенном справа от списка.

**Категория грунта** — выбирается из одноименного списка. В случае выбора IV категории необходимо в одноименном поле задать **коэффициент учета нелинейного деформирования грунта**.

**Поправочный коэффициент** — задается для корректировки результатов, если имеется необходимость полнее учесть требования норм. Этот коэффициент может принимать любое положительное значение, и на него умножаются результаты расчета инерционных сил от сейсмического воздействия.

**Направление вектора сейсмического воздействия** — определяется вектором, заданным в общей системе координат.

**Учет крутильной компоненты** (Приложение Г) — если учитывается крутильная компонента (активирован одноименный маркер), то необходимо задать координаты центра вращения и направление вектора крутильного воздействия.

**Координаты центра вращения** — в качестве координат центра вращения следует принимать координаты центра тяжести пятна основания здания, считая основание однородным по всей площади.

**Направление вектора крутильного воздействия** — задается вектором ротационного ускорения.

**Минимальный размер в плане** — используется при определении коэффициента, учитывающего размеры сооружения в плане (п. Г.6).

**Этажность** — количество этажей.

**Графики коэффициентов динамичности** — в дополнение к спектрам графиков коэффициентов динамичности, приведенных в нормах, допускается использование специальных графиков, задаваемых в виде файла. Предусмотрено использование единого такого графика по всем трем направлениям, или разных для каждого направления воздействия. В зависимости от активного маркера может быть использован график норм (маркер **По нормам**), загружен заранее подготовленный файл с единым графиком (маркер **Единый график**) или три файла с отдельными графиками для каждого направления (маркер **Раздельный для каждого направления**). График может быть получен с использованием программы-сателлита **Редактор графика коэффициентов динамичности**, входящей в комплект поставки системы **SCAD Office** (см. раздел 0). Если файл с графиком выбран, то кнопка  , позволяет вызвать **Редактор графика коэффициентов динамичности** для просмотра графика.

## Расчет на сейсмические воздействия по строительным нормам Украины ДБН В.1.1-12:2014

При подготовке исходных данных следует обратить внимание на следующие факторы:

**Число учитываемых форм собственных колебаний** — согласно данному нормативному документу минимальное количество учитываемых форм собственных колебаний назначается таким образом, чтобы сумма модальных масс составляла не менее 85% общей массы системы, возбуждаемой по направлению действия сейсмического воздействия для горизонтальных воздействий и не менее 75% — для вертикального воздействия. Для автоматического определения необходимого количества форм собственных колебаний используется метод Ланцоша (только совместно с многофронтальным или PARFES процессорами).

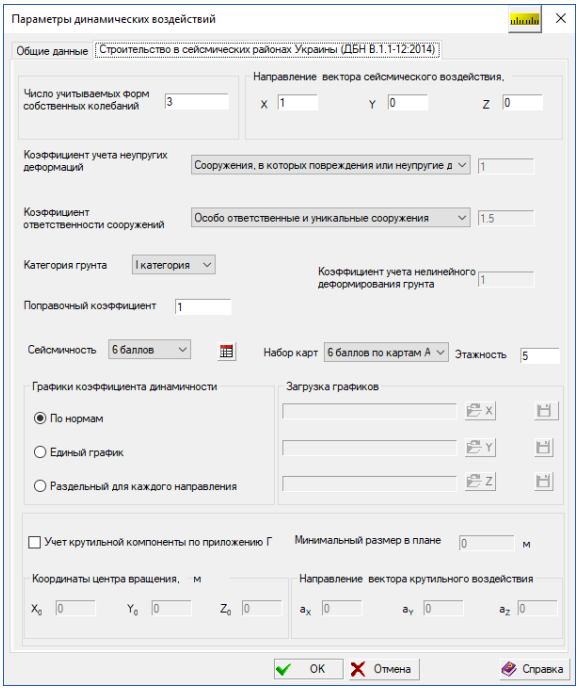



Рис. 8.7-12. *Страница* **Строительство в сейсмических районах Украины**

**Сейсмичность** — задается без учета категории грунта. ***Изменение сейсмичности в зависимости от категории грунта следует учесть при задании значения поправочного коэффициента***. Значение расчетной сейсмичности для конкретной местности может задаваться путем выбора из списка или обращением к операции **Выбор населенного пункта**, кнопка вызова которой  расположена справа от списка. В последнем случае открывается диалоговое окно со

списком населенных пунктов, соответствующим Приложению А. После указания в списке на графу со значением сейсмичности и нажатия кнопки **ОК** окно закрывается и выбранное значение отображается в списке **Сейсмичность**.

**Коэффициент учета неупругих деформаций** — учитывает неупругую работу конструкции и локальные повреждения в ней (берется из таблицы 6.3). Значение коэффициента зависит от сейсмичности площадки строительства.

**Коэффициент ответственности сооружения** — выбирается из списка, соответствующего таблице 2.4. В случае выбора в списке графы **Другие** — значение следует задать в поле ввода, расположенном справа от списка.

**Категория грунта** — выбирается из одноименного списка. В случае выбора IV категории необходимо в одноименном поле задать **коэффициент учета нелинейного деформирования грунта**.

**Поправочный коэффициент** — задается для корректировки результатов, если имеется необходимость полнее учесть требования норм. Этот коэффициент может принимать любое положительное значение, и на него умножаются результаты расчета инерционных сил от сейсмического воздействия.

**Направление вектора сейсмического воздействия** — определяется вектором, заданным в общей системе координат.

**Учет крутильной компоненты** (Приложение И) — если учитывается крутильная компонента (активирован одноименный маркер), то необходимо задать координаты центра вращения и направление вектора крутильного воздействия.

**Координаты центра вращения** — в качестве координат центра вращения следует принимать координаты центра тяжести пятна основания здания, считая основание однородным по всей площади.

**Направление вектора крутильного воздействия** — задается вектором ротационного ускорения.

**Минимальный размер в плане** — используется при определении коэффициента, учитывающего размеры сооружения в плане (п. И.6).

**Этажность** — количество этажей.

**Графики коэффициентов динамичности** — в дополнение к спектрам графиков коэффициентов динамичности, приведенных в нормах, допускается использование специальных графиков, задаваемых в виде файла. Предусмотрено использование единого такого графика по всем трем направлениям, или разных для каждого направления воздействия. В зависимости от активного маркера может быть использован график норм (маркер **По нормам**), загружен заранее подготовленный файл с единым графиком (маркер **Единый график**) или три файла с отдельными графиками для каждого направления (маркер **Раздельный для каждого направления**). График может быть получен с использованием программы-сателлита **Редактор графика коэффициентов динамичности**, входящей в комплект поставки системы **SCAD Office** (см. раздел 0). Если файл с графиком выбран, то кнопка  , позволяет вызвать **Редактор графика коэффициентов динамичности** для просмотра графика.

### Расчет на сейсмические воздействия по СНиП В1.2-4-98 республики Казахстан

При подготовке исходных данных следует обратить внимание на следующие факторы:

**Сейсмичность** — задается без учета категории грунта. ***Изменение сейсмичности в зависимости от категории грунта следует учесть при задании значения поправочного коэффициента***.

**Поправочный коэффициент** — задается для корректировки результатов, если имеется необходимость полнее учесть требования норм. Этот коэффициент может принимать любое положительное значение, и на него умножаются результаты расчета инерционных сил от сейсмического воздействия.

**Направление воздействия** — определяется вектором, заданным в общей системе координат.

**Значения коэффициентов** $K_1$, $K_2$ и $K_\psi$ назначаются автоматически путем выбора характеристик в выпадающих списках, совпадающих соответственно с таблицами 3.2, 3.3 и 3.4 СНиП. Отображение коэффициентов в полях ввода справа от выпадающего списка приводятся для справок. Поля становятся доступными для ввода в случае, если в списке выбрана графа **Другое**.

Опции **Ограничить число форм …**, **Учет вертикальной сейсмической нагрузки**, **Учет балконов, козырьков, подвесных потолков …** могут активироваться в любой комбинации.

Опции **Учет навесных панелей, перегородок …** и **Учет конструкций, возвышающихся над зданием** — взаимоисключающие.

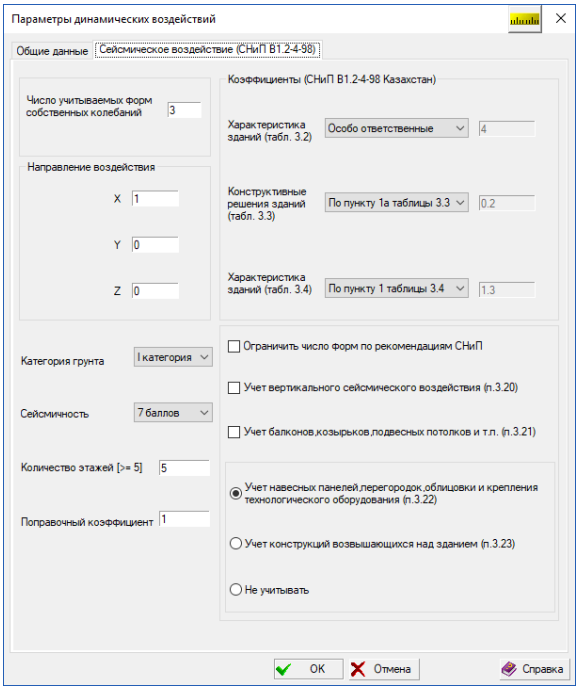



Рис. 8.7-13. *Страница* **Сейсмическое воздействие (СНиП В1.2-4-98)**

## Расчет на сейсмические воздействия по СНиП РК 2.03-30-2006 республики Казахстан

При подготовке исходных данных следует обратить внимание на следующие факторы:

**Сейсмичность** — задается без учета категории грунта. ***Изменение сейсмичности в зависимости от категории грунта следует учесть при задании значения поправочного коэффициента***.

**Поправочный коэффициент** — задается для корректировки результатов, если имеется необходимость полнее учесть требования норм. Этот коэффициент может принимать любое положительное значение, и на него умножаются результаты расчета инерционных сил от сейсмического воздействия.

**Направление воздействия** — определяется вектором, заданным в общей системе координат.

**Значения коэффициентов** $K_1$ (учет ответственности здания), $K_2$ (учет конструктивных решений здания), $K_3$ (учет высоты здания) и $K_\psi$ (учет способности здания к рассеиванию энергии колебаний) назначаются автоматически путем выбора характеристик в выпадающих списках, совпадающих соответственно с таблицами 5.2, 5.3 и 5.4 СНиП. Отображение коэффициентов в полях ввода справа от выпадающего списка приводятся для справок. Поля становятся доступными для ввода в случае, если в списке выбрана графа **Другое** ($K_1$) или **По результатам исследований** ($K_2$).

Опции **Несущие и самонесущие стены** и **Конструкции, возвышающихся над зданием**, **Крепление технологического оборудования**, **Балконы, козырьки** — взаимоисключающие.

**Графики коэффициентов динамичности** — в дополнение к спектрам графиков коэффициентов динамичности, приведенных в нормах, допускается использование специальных графиков, задаваемых в виде файла. Предусмотрено использование единого такого графика по всем

трем направлениям, или разных для каждого направления воздействия. В зависимости от активного маркера может быть использован график норм (маркер **По нормам**), загружен заранее подготовленный файл с единым графиком (маркер **Единый график**) или три файла с отдельными графиками для каждого направления (маркер **Раздельный для каждого направления**). График может быть получен с использованием программы-сателлита **Редактор графика коэффициентов динамичности**, входящей в комплект поставки системы **SCAD Office** (см. раздел 0). Если файл с графиком выбран, то кнопка  , позволяет вызвать **Редактор графика коэффициентов динамичности** для просмотра графика.

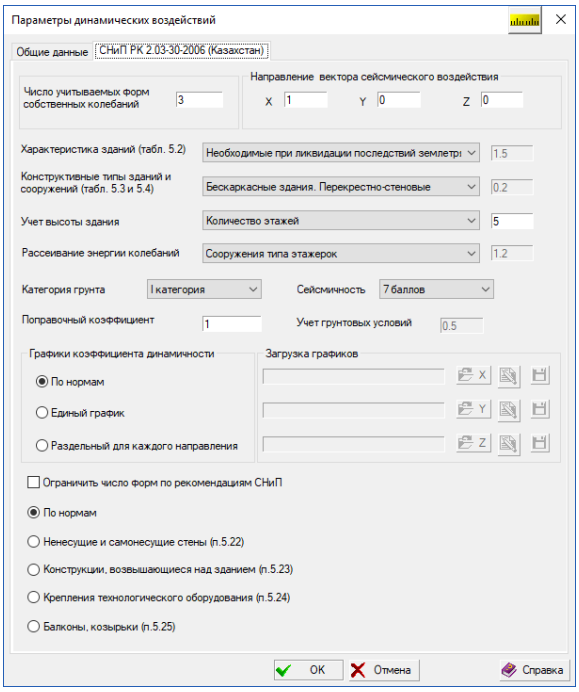



Рис. 8.7-14. *Страница* **Сейсмическое воздействие (РК 2.03-30-2006)**

## Расчет на сейсмические воздействия по СП РК 2.03-30-2017, СП РК 2.03-30-2017* и НТП РК 08-01.1-2017 республики Казахстан

При подготовке исходных данных следует обратить внимание на следующие факторы:

**Ускорение** – расчетное горизонтальное ускорение на площадке строительства, определяемое в соответствии с п. 7.5.5 СП или по его приложению Е.

**Направление воздействия** — определяется вектором, заданным в общей системе координат.

**Класс ответственности по назначению** задается в соответствии с табл. 7.2.

**Класс ответственности по этажности** задается в соответствии с табл. 7.3.

**Тип здания** определяет выбор коэффициентов из табл. 7.8 или 7.9. Отображение коэффициента в поле ввода справа от выпадающего списка приводится для справки. Поле становится доступным для ввода в случае, если в списке табл. 7.8 выбрана графа 10а или 10б.

**Коэффициент поведения для вертикальных нагрузок** определяет коэффициент поведения *q*, учитываемый при определении расчетных вертикальных сейсмических нагрузок. Этот коэффициент принимает значение 1.5 во всех случаях, за исключением случая, когда выбран тип здания *Экспериментальные исследования* (при этом пользователь может ввести значение, уточненное по результатам экспериментально-теоретических исследований).

**Поправочный коэффициент** — задается для корректировки результатов, если имеется необходимость полнее учесть требования норм. Этот коэффициент может принимать любое положительное значение, и на него умножаются результаты расчета инерционных сил от сейсмического воздействия.

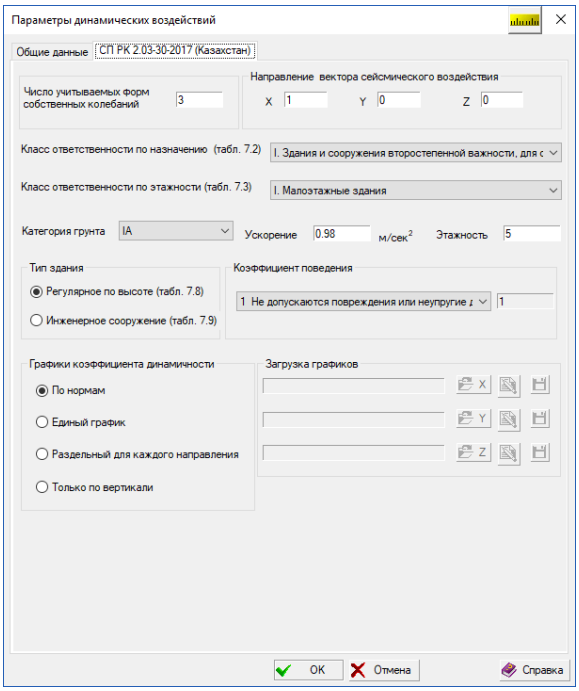



Рис. 8.7-15. *Страница* **Сейсмическое воздействие (СП РК 2.03-30-2017)**

**Графики коэффициентов динамичности** — в дополнение к спектрам графиков коэффициентов динамичности, приведенных в нормах, допускается использование специальных графиков, задаваемых в виде файла. Предусмотрено использование единого такого графика по всем трем направлениям, или разных для каждого направления воздействия. В зависимости от активного маркера может быть использован график норм (маркер **По нормам**), загружен заранее подготовленный файл с единым графиком (маркер **Единый график**) или три файла с отдельными графиками для каждого направления (маркер **Раздельный для каждого направления**). Если выбрана опция **По вертикали**, то задается график для реализации требований пункта 7.5.4. График может быть получен с использованием программы-сателлита **Редактор графика коэффициентов динамичности**, входящей в комплект поставки системы **SCAD Office** (см. раздел 0). Если файл с графиком выбран, то кнопка  , позволяет вызвать **Редактор графика коэффициентов динамичности** для просмотра графика.

Для каждого элемента коэффициент $f_{vk}$ может быть назначена с помощью операции **Назначение дополнительных данных для элементов**. Для элементов, которым данный параметр не назначен, расчет производится в предположении $f_{vk}$=1.

## Расчет на сейсмические воздействия по CHPA II-2.02.94 республики Армения

**Поправочный коэффициент** — задается для корректировки результатов, если имеется необходимость полнее учесть требования норм. Этот коэффициент может принимать любое положительное значение, и на него умножаются результаты расчета инерционных сил от сейсмического воздействия.

**Направление воздействия** — определяется вектором, заданным в общей системе координат.

Значения остальных коэффициентов берутся из таблиц нормативного документа.

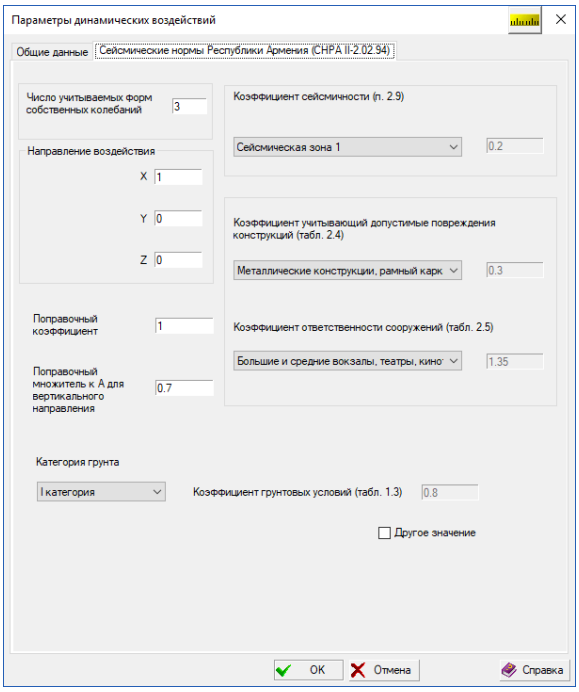



Рис. 8.7-16. *Страница* **Сейсмические нормы Республики Армения (CHPA II-2.02.94)**

## Расчет на сейсмические воздействия по СНРА II-6.02.2006 республики Армения

**Поправочный коэффициент** — задается для корректировки результатов, если имеется необходимость полнее учесть требования норм. Этот коэффициент может принимать любое положительное значение, и на него умножаются результаты расчета инерционных сил от сейсмического воздействия.

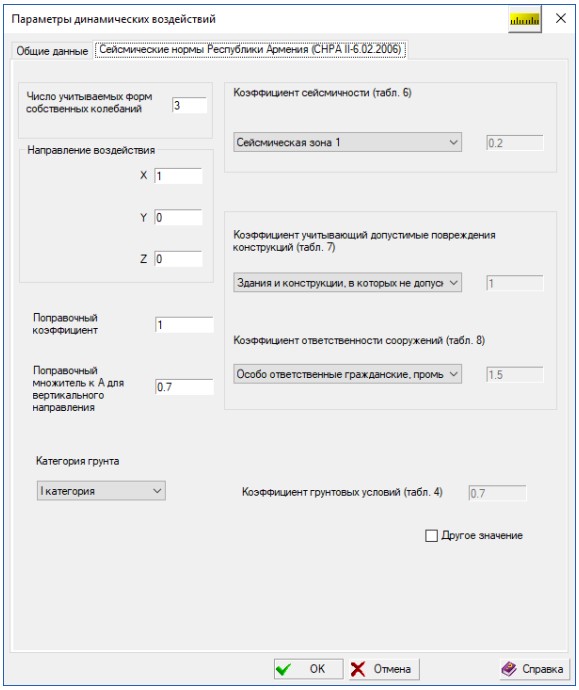



Рис. 8.7-17. *Страница* **Сейсмические нормы Республики Армения (СНРА II-6.02.2006)**

**Направление воздействия** — определяется вектором, заданным в общей системе координат. Значения остальных коэффициентов берутся из таблиц нормативного документа.

### Расчет на сейсмические воздействия по CHPA AzDTN 2.3-1 Республики Азербайджан

**Поправочный коэффициент** — задается для корректировки результатов, если имеется необходимость полнее учесть требования норм. Этот коэффициент может принимать любое положительное значение, и на него умножаются результаты расчета инерционных сил от сейсмического воздействия.

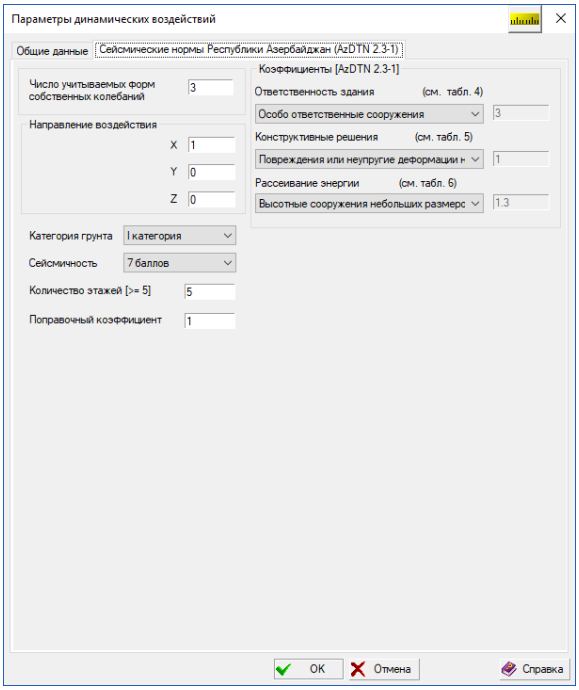



Рис. 8.7-18. *Страница* **Сейсмические нормы Республики Азербайджан (AzDTN 2.3-1)**

**Направление воздействия** — определяется вектором, заданным в общей системе координат. Значения остальных коэффициентов берутся из таблиц нормативного документа.

### Расчет на сейсмические воздействия по СНТ 2.01.08-99 и СНТ 2.01.08-99* Туркменистана

**Поправочный коэффициент** — задается для корректировки результатов, если имеется необходимость полнее учесть требования норм. Этот коэффициент может принимать любое положительное значение, и на него умножаются результаты расчета инерционных сил от сейсмического воздействия.

**Направление вектора сейсмического воздействия** — определяется вектором, заданным в общей системе координат.

Значения остальных коэффициентов берутся из таблиц нормативного документа.

**Графики коэффициентов динамичности** — в дополнение к спектрам графиков коэффициентов динамичности, приведенных в нормах, допускается использование специальных графиков, задаваемых в виде файла. Предусмотрено использование единого такого графика по всем трем направлениям, или разных для каждого направления воздействия. В зависимости от активного маркера может быть использован график норм (маркер **По нормам**), загружен заранее подготовленный файл с единым графиком (маркер **Единый график**) или три файла с отдельными графиками для каждого направления (маркер **Раздельный для каждого направления**). Значения остальных коэффициентов берутся из нормативного документа.

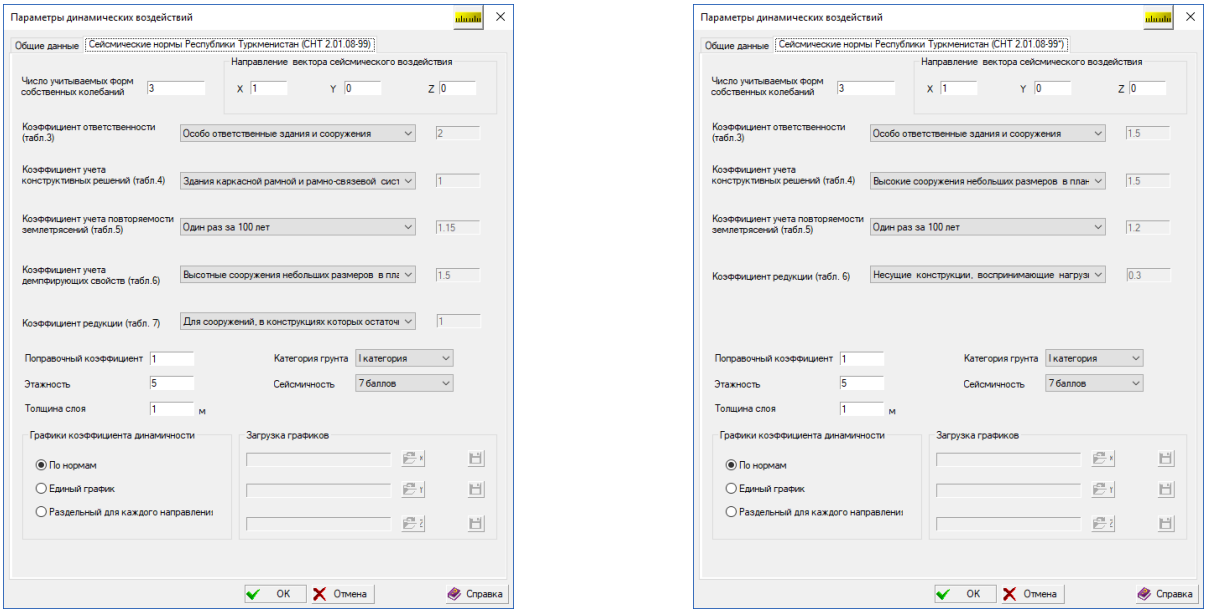



Рис. 8.7-19. *Страница* **Сейсмические нормы Туркменистана СНТ 2.01.08-99 и СНТ 2.01.08-99***

### Расчет на сейсмические воздействия по КМК 2.01.03-96, КМК 2.01.03-19 Республики Узбекистан

**Поправочный коэффициент** — задается для корректировки результатов, если имеется необходимость полнее учесть требования норм. Этот коэффициент может принимать любое положительное значение, и на него умножаются результаты расчета инерционных сил от сейсмического воздействия.

**Направление вектора сейсмического воздействия** — задается значениями косинусов углов по отношению к осям общей системы координат.

Значения остальных коэффициентов берутся из таблиц нормативного документа в зависимости от определяющего их фактора, выбранного из соответствующего списка. Эти значения отображаются в информационных полях, расположенных справа от списка.

**Графики коэффициентов динамичности** — в дополнение к спектрам графиков коэффициентов динамичности, приведенных в нормах, допускается использование специальных графиков, задаваемых в виде файла. Предусмотрено использование единого такого графика по всем

трем направлениям, или разных для каждого направления воздействия. В зависимости от активного маркера может быть использован график норм (маркер **По нормам**), загружен заранее подготовленный файл с единым графиком (маркер **Единый график**) или три файла с отдельными графиками для каждого направления (маркер **Раздельный для каждого направления**).

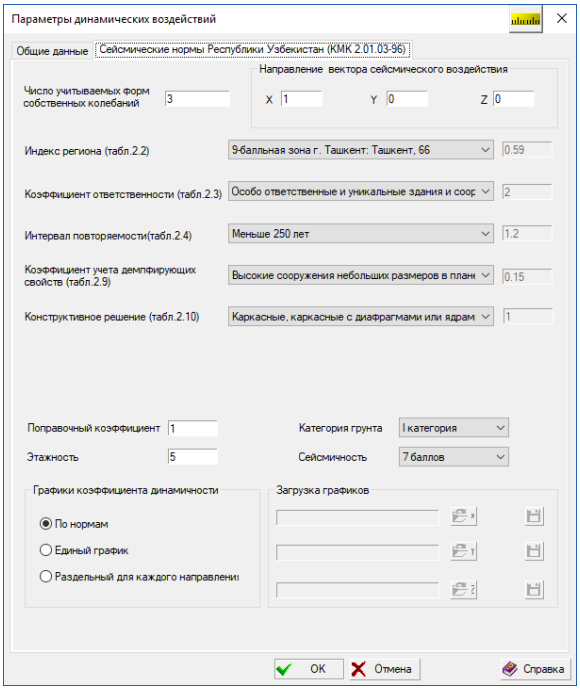



Рис. 8.7-20. *Страница* **Сейсмические нормы Республики Узбекистан**

Для каждого элемента параметр μ (предельная относительная неупругая деформация) может быть назначен с помощью операции **Назначение дополнительных данных для элементов** (см. раздел 7.3). Для элементов, которым данный параметр не назначен, расчет производится в предположении идеальной упругости (μ = 1), и коэффициент редукции *r* в формуле (2.8) КМК 2.01.03-96 принимается равным 1.

## Расчет на сейсмические воздействия по СНиП КР 20-02:2009 Кыргызской Республики

**Поправочный коэффициент** — задается для корректировки результатов, если имеется необходимость полнее учесть требования норм. Этот коэффициент может принимать любое положительное значение, и на него умножаются результаты расчета инерционных сил от сейсмического воздействия.

**Направление вектора сейсмического воздействия** — задается значениями косинусов углов по отношению к осям общей системы координат.

Значения остальных коэффициентов берутся из таблиц нормативного документа в зависимости от определяющего их фактора, выбранного из соответствующего списка. Эти значения отображаются в информационных полях, расположенных справа от списка.

**Графики коэффициентов динамичности** — в дополнение к спектрам графиков коэффициентов динамичности, приведенных в нормах, допускается использование специальных графиков, задаваемых в виде файла. Предусмотрено использование единого такого графика по всем трем направлениям, или разных для каждого направления воздействия. В зависимости от активного маркера может быть использован график норм (маркер **По нормам**), загружен заранее подготовленный файл с единым графиком (маркер **Единый график**) или три файла с отдельными графиками для каждого направления (маркер **Раздельный для каждого направления**).

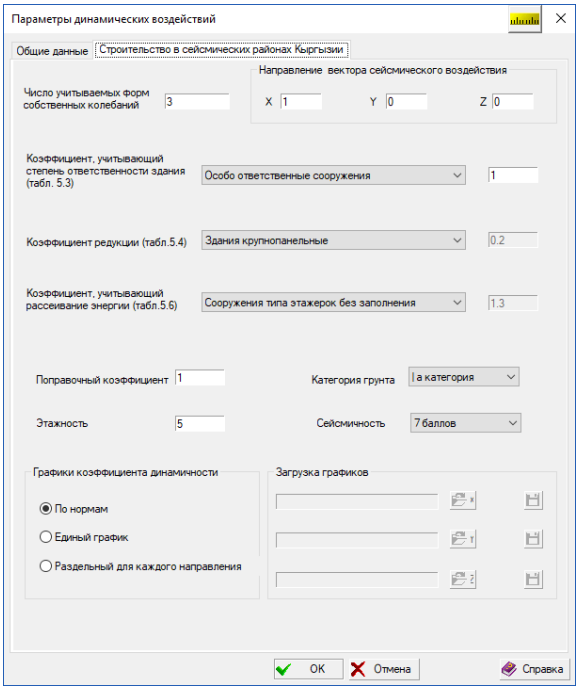



Рис. 8.7-21. *Страница* **Сейсмические нормы Кыргызской Республики (СНиП КР 20-02:2009)**

## Расчет на сейсмические воздействия по ГНиП РТ 22-07-2015, ГНиП РТ 22-07-2018 Республики Таджикистан

**Поправочный коэффициент** — задается для корректировки результатов, если имеется необходимость полнее учесть требования норм. Этот коэффициент может принимать любое положительное значение, и на него умножаются результаты расчета инерционных сил от сейсмического воздействия.

**Направление вектора сейсмического воздействия** — определяется вектором, заданным в общей системе координат.

Значения остальных коэффициентов берутся из таблиц нормативного документа.

**Графики коэффициента динамичности** — в дополнение к спектрам графиков коэффициентов динамичности, приведенных в нормах, допускается использование специальных

графиков, задаваемых в виде файла. Предусмотрено использование единого такого графика по всем трем направлениям, или разных для каждого направления воздействия. В зависимости от активного маркера может быть использован график норм (маркер **По нормам**), загружен заранее подготовленный файл с единым графиком (маркер **Единый график**) или три файла с отдельными графиками для каждого направления (маркер **Раздельный для каждого направления**). Значения остальных коэффициентов берутся из нормативного документа.

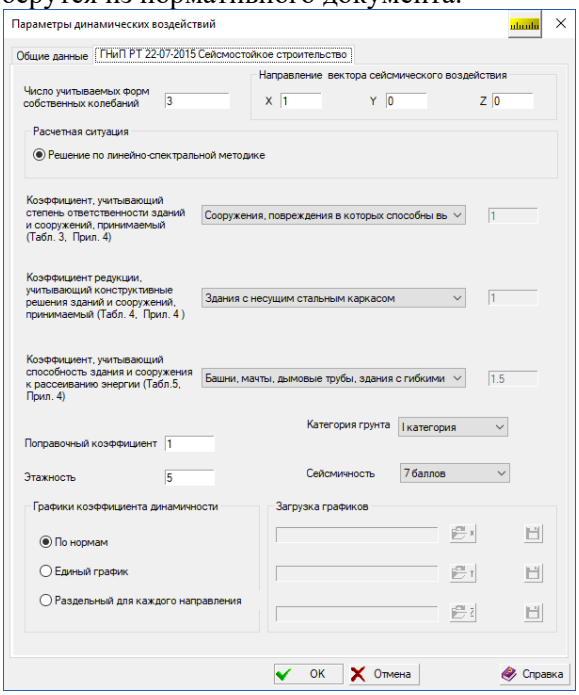



Рис. 8.7-22. *Страница* **Сейсмические нормы Республики Таджикистан (ГНиП РТ 22-07-2015/2018)**

## Расчет на сейсмические воздействия по СП 358.1325800.2017

При подготовке исходных данных следует обратить внимание на следующие факторы:

**Категория грунта** по сейсмическим свойствам — выбирается из одноименного списка.

**Коэффициент учета неупругих деформаций (Коэффициент, учитывающий демпфирующие свойства конструкции)** — учитывает неупругую работу конструкции и допускаемые повреждения в ней. Вид конструкции выбирается из выпадающего списка. Справочное значение коэффициента выводится в информационном поле рядом со списком.

**Поправочный коэффициент** — задается для корректировки результатов, если имеется необходимость полнее учесть требования СП. Этот коэффициент может принимать любое положительное значение, и на него умножаются результаты расчета инерционных сил от сейсмического воздействия.

**Направление вектора сейсмического воздействия** — задается значениями косинусов углов по отношению к осям общей системы координат.

**Высота гидротехнического сооружения** — задается в одноименном поле.

**Расчетное ускорение** — зависит от значения исходной сейсмичности площадки строительства, расчетной сейсмичности и грунтовых условий; задается в долях g согласно таблице 6.1.

**Графики коэффициентов динамичности** — рассматриваемые нормы допускают использование специальных форм графика (спектра) коэффициентов динамичности. График может быть задан в виде кусочно-линейной функции и сохраняться в файле с расширением **.spd**. График может быть получен с использованием программы-сателлита **Редактор графика коэффициентов динамичности**, входящей в комплект поставки системы **SCAD Office**. Если файл с графиком выбран, то кнопка  , позволяет вызвать **Редактор графика коэффициентов динамичности** для просмотра графика.

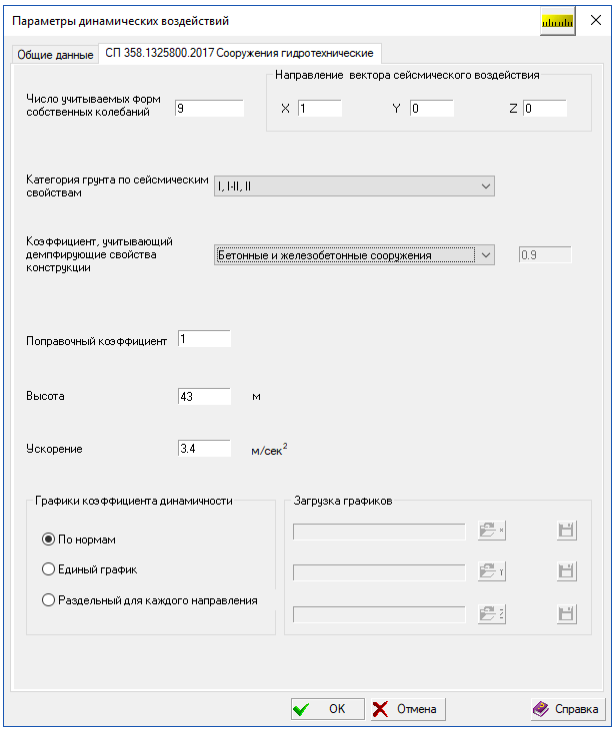



Рис. 8.7-23. *Страница* **СП 358.1325800.2017 Сооружения гидротехнические**

Кроме единого графика предусмотрена возможность задания трех графиков — отдельно для каждого направления воздействия. В зависимости от активного маркера может быть использован график, приведенный в нормах (маркер **По нормам**), загружен заранее подготовленный файл с единым графиком (маркер **Единый график**) или три файла с отдельными графиками для каждого направления (маркер **Раздельно для каждого направления**).

## Расчет на сейсмические воздействия по EN 1998-1

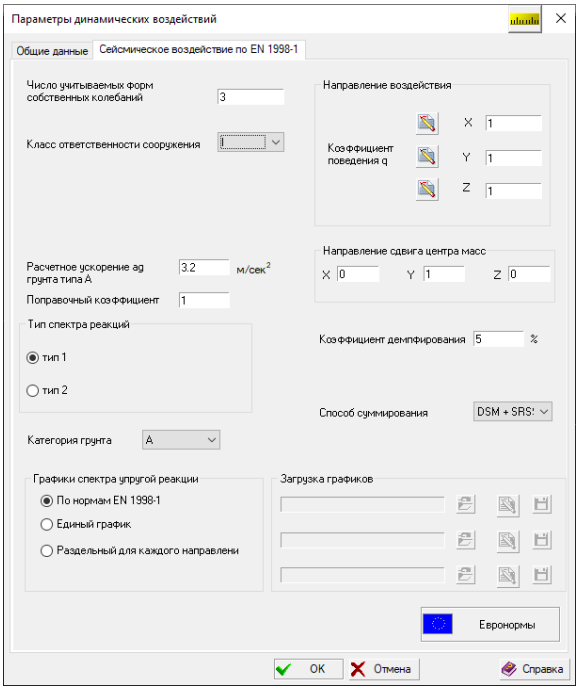



Рис. 8.7-24. *Страница* **Сейсмическое воздействие по EN 1998-1** *диалогового окна* **Параметры динамических воздействий**

Исходные данные для расчета на сейсмические воздействия с учетом рекомендаций Еврокода задаются в диалоговом окне **Параметры динамических воздействий** на странице **Сейсмическое воздействие по EN 1998-1** (рис. 8.7-24) и включают следующие параметры:

**Класс ответственности** — Еврокод относит все сооружения по классу ответственности к одному из четырех типов: I, II, III или IV. В зависимости от класса ответственности значения коэффициентов ответственности принимаются соответственно $\gamma_I = 0{,}8$; $\gamma_I = 1{,}0$; $\gamma_I = 1{,}2$; $\gamma_I = 1{,}4$.

**Расчетное ускорение $a_g$ для грунта типа А** — Расчетное значение ускорения получается умножением на коэффициент $\gamma_I$ референтного пикового ускорения $a_{gR}$ для грунта типа А, определенного по карте сейсмического районирования, с принятой вероятностью превышения.

**Направление воздействия** — Еврокод не использует понятия «направление сейсмического воздействия», всегда рассматриваются три варианта воздействия (вдоль оси X, вдоль оси Y и вертикальное — вдоль оси Z). Расчеты по этим вариантам выполняются с учетом коэффициента поведения q (по умолчанию равен 1,0), заданного для каждого направления воздействия.

Выбор значения коэффициента поведения q выполняется в одноименном диалоговом окне (рис. 8.7-25), которое открывается нажатием кнопки  , соответствующей нужному направлению воздействия.

**Коэффициент демпфирования колебаний** — Еврокод предусматривает, что коэффициент демпфирования колебаний равен 5% от критического значения (принят по умолчанию). При необходимости это значение можно заменить.

**Тип спектра реакций** — В отличие от отечественных норм, Еврокод использует не график коэффициента динамичности, а спектральные кривые $S_e(T)$, которые имеют различный вид в зависимости от направления сейсмического воздействия. При этом для спектра предусматривается возможность выбора: тип 1 — для районов с высокой сейсмичностью или тип 2 — для случая умеренной сейсмичности.

**Категория грунта** — Грунтовые условия площадки строительства характеризуются одной из пяти категорий A, B, C, D или E (в отличие от отечественных норм, где указаны только три категории грунта).

**Способ суммирования** — В программе предусмотрены различные варианты получения результирующего воздействия с учетом воздействий по разным направлениям (см. Табл. 8.6-2):

1. DSM+SRSS;
2. DSM+Newmark(0.3);
3. DSM+Newmark(0.4);
4. SRSS+Newmark(0.3);
5. SRSS+Newmark(0.4);
6. CQC+SRSS;
7. CQC+Newmark(0.3);
8. CQC+Newmark(0.4);
9. SRSS.

Сначала указан метод суммирования модальных реакций по всем формам колебаний по направлениям X,Y и Z. Из полученных трех величин строятся комбинации методом, указанным вторым.

**Поправочный коэффициент** — задается для корректировки результатов, если имеется необходимость полнее учесть требования норм. Этот коэффициент может принимать любое положительное значение, и на него умножаются результаты расчета инерционных сил от сейсмического воздействия.

**Число учитываемых форм собственных колебаний** — согласно данному нормативному документу минимальное количество учитываемых форм собственных колебаний назначается таким образом, чтобы сумма модальных масс составляла не менее 85% общей массы системы, возбуждаемой по направлению действия сейсмического воздействия для горизонтальных воздействий и не менее 75% — для вертикального воздействия. Для автоматического определения необходимого количества форм собственных колебаний используется метод Ланцоша (только совместно с многофронтальным или PARFES процессорами).

**Графики спектра упругой реакции** — в дополнение к графикам спектров, приведенным в нормах, допускается использование специальных графиков, задаваемых в виде файла. Предусмотрено использование единого такого графика по всем трем направлениям, или разных для каждого направления воздействия. В зависимости от активного маркера может быть использован график из норм (маркер **По нормам**), загружен заранее подготовленный файл с единым графиком (маркер **Единый график**) или три файла с отдельными графиками для каждого направления (маркер **Раздельный для каждого направления**). Если файл с графиком выбран, то кнопка позволяет вызвать программу **Редактор графика коэффициента динамичности**, с помощью которой можно просмотреть график спектра упругой реакции.

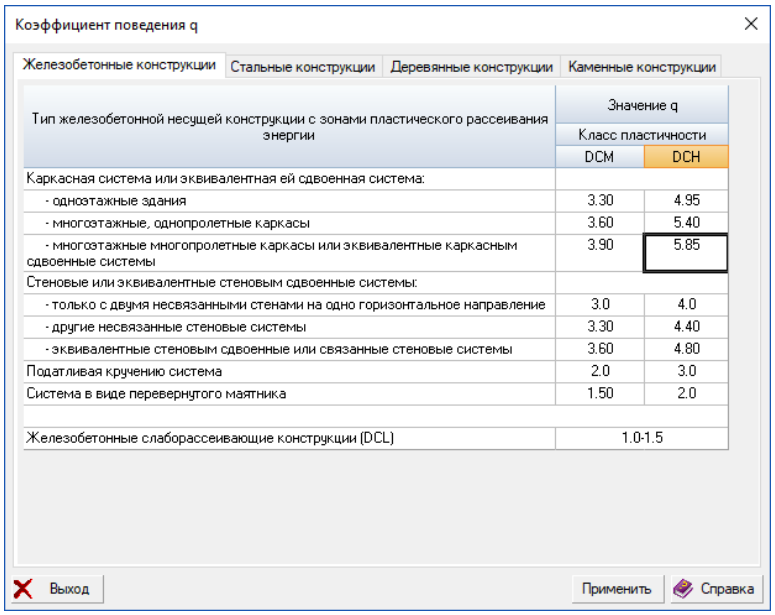



Рис. 8.7-25. Диалоговое окно **Коэффициент поведения q**

Для стран, национальные приложения которых предусматривают альтернативные графики спектров упругих реакций (например, Казахстана), предусмотрен выбор графика по соотвествующему национальному документу.

В группе **Направление сдвига центра масс** можно задать вектор, в направлении которого будет производиться сдвиг центра масс. Если все компоненты вектора заданы нулевыми, то свдвиг центра масс не будет учтен.

## Расчет на сейсмические воздействия по акселерограмме

Данные для выполнения расчета по акселерограммам вводятся на странице **Расчет на сейсмику по одной акселерограмме** (рис. 8.7-26). В этом расчете одна акселерограмма действует по направлениям X, Y и Z. В этом режиме необходимо указать:

- количество учитываемых форм собственных колебаний;
- направление действия сейсмической нагрузки — определяется вектором, заданным в общей системе координат.

Кроме этих данных следует выбрать имя файла (кнопкой ), который содержит ординаты акселерограммы, а также задать коэффициент потерь и масштабный множитель к акселерограмме.

Кнопка активирует диалоговое окно, с помощью которого можно получить справочную информацию о коэффициентах неупругого сопротивления различных конструкций. Выбрав нужный тип конструкции и нажав кнопку **ОК**, можно перенести соответствующую величину коэффициента потерь в данные загружения. Кроме того, если в качестве типа конструкции выбран пункт **Другие типы конструкций**, то введя одно из возможных представлений информации о

неупругом сопротивлении (например, логарифмический декремент колебаний) можно получить нужный коэффициент потерь.

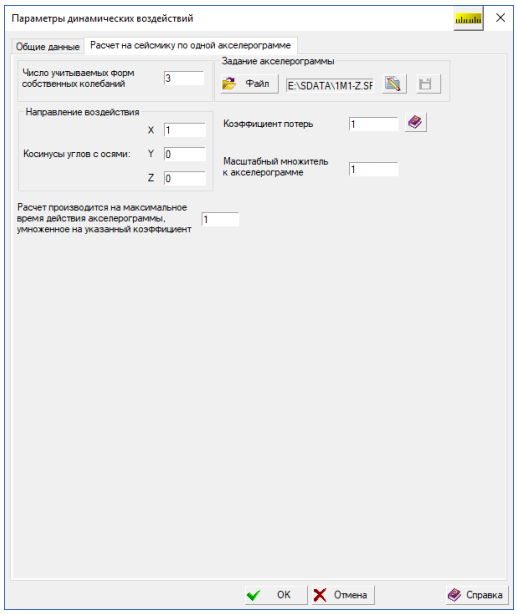



Рис. 8.7-26. *Страница* **Расчет на сейсмику по одной акселерограмме**

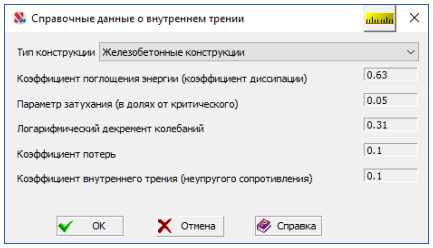



Рис. 8.7-27. *Диалоговое окно* **Справочные данные о внутреннем трении**

Файлы акселерограмм (имеющие расширение .**spc**) могут быть подготовлены с помощью программы **Редактор Акселерограмм**, описание которой приведено в разделе 34.8.

Программа позволяет произвести **расчет на максимальное время действия акселерограммы, умноженное на заданный пользователем коэффициент**. Смысл данного коэффициента состоит в том, что будет произведен расчет не только в период действия акселерограммы, но и после завершения землетрясения, когда воздействие уже закончилось, но движение еще есть.

## Расчет на сейсмические воздействия по заданным акселерограммам (3 компоненты)

Данные для выполнения расчета на сейсмические воздействия по акселерограммам с учетом одновременных воздействий по трем направлениям вводятся по тем же правилам, что и для расчета по одному направлению. Отличие состоит в том, что в список акселерограмм включаются имена трех файлов, в которых записаны ординаты акселерограмм по направлениям X, Y и Z, соответственно (рис. 8.7-28). **Направление воздействия в плоскости XOY** задает местную ось $X_1$, по направлению которой будет работать первая акселерограмма. Вторая акселерограмма будет действовать по нормали к заданному направлению.

Файлы акселерограмм (имеющие расширение .**spc**) могут быть подготовлены с помощью программы **Редактор Акселерограмм**, описание которой приведено в разделе 34.8.

Если файл с акселерограммой выбран, то кнопка  позволяет вызвать **Редактор Акселерограмм** для просмотра акселерограммы и ее параметров.

Для каждой акселерограммы можно задать свой масштабный множитель. Каждая акселерограмма загружается, используя соответствующую кнопку  .

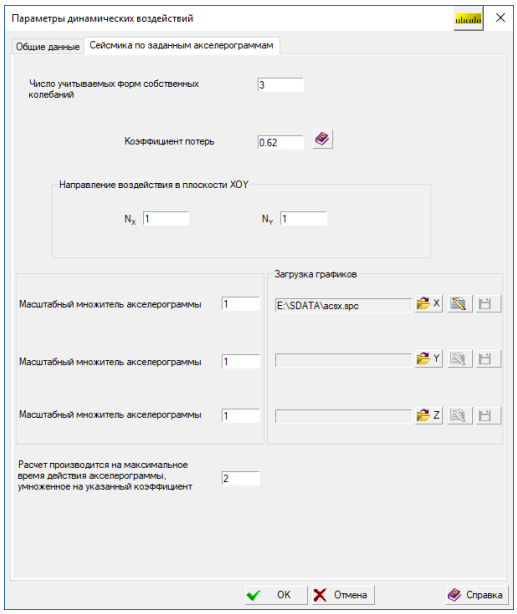



Рис. 8.7-28. *Страница* **Сейсмика по заданным акселерограммам**

Направление действия сейсмической нагрузки (в плоскости XOY) определяется вектором, заданным в общей системе координат.

Кнопка  активирует диалоговое окно, с помощью которого можно получить справочную информацию о коэффициентах неупругого сопротивления различных конструкций (рис. 8.7-26). Выбрав нужный тип конструкции и нажав кнопку **ОК**, можно перенести соответствующую величину коэффициента потерь в данные загружения. Кроме того, если в качестве типа конструкции выбран пункт **Другие типы конструкций**, то введя одно из возможных представлений информации о неупругом сопротивлении (например, логарифмический декремент колебаний) можно получить нужный коэффициент потерь.

Программа позволяет произвести **расчет на максимальное время действия акселерограммы, умноженное на заданный пользователем коэффициент**. Смысл данного коэффициента состоит в том, что будет произведен расчет не только в период действия акселлерограммы, но и после завершения землетрясения, когда воздействие уже закончилось, но движение еще есть.

## Расчет на сейсмические воздействия при шестикомпонентном воздействии

Операция позволяет произвести динамический расчет для случая, когда по каждому из шести направлений задан свой график коэффициентов динамичности. При задании исходных данных следует задать хотя бы один график. Если для какого-то направления график не задан, то считается, что воздействия по данному направлению нет.

Загрузка графиков коэффициентов динамичности производится нажатием соответствующей кнопки  и выбором нужного spd-файла. Если файл с графиком коэффициентов динамичности выбран, то кнопка  , позволяет вызвать **Редактор графика коэффициентов динамичности** для его просмотра (рис. 8.7-29).

Кроме того, требуется задать следующие данные:

- количество учитываемых форм собственных колебаний;
- частоту среза — верхнюю границу частот, которые адекватно представлены в модели для расчета динамического взаимодействия сооружения с основанием. Ее можно выбирать на уровне удвоенной доминантной частоты системы “сооружение-основание” в выбранном направлении, но не менее 10 Гц;
- логарифмический декремент колебаний;
- поправочный коэффициент — задается для корректировки результатов, если имеется необходимость полнее учесть требования норм. Этот коэффициент может принимать любое положительное значение, и на него умножаются результаты расчета инерционных сил от сейсмического воздействия;

- правило суммирования — можно выбрать правило суммирования форм колебаний — по правилу "сумма квадратов", по рекомендациям СП 14.13330.2014 (формула (9)) или ASCE4-98 (формула (3.2-19));
- суммирование компонент — можно выбрать стандартное правило суммирования реакций (по правилу "сумма квадратов") по направлениям шестикомпонентного сейсмического воздействия или использовать суммирование с полностью коррелированным качанием, которое производится по формуле $\pm\sqrt{\left(\left|R_x\right|+\left|R_{ux}\right|\right)^2+\left(\left|R_y\right|+\left|R_{uy}\right|\right)^2+R_z^2+R_{uz}^2}$ .

Программа позволяет произвести **расчет на максимальное время действия акселерограммы, умноженное на заданный пользователем коэффициент**. Смысл данного коэффициента состоит в том, что будет произведен расчет не только в период действия акселлерограммы, но и после завершения землетрясения, когда воздействие уже закончилось, но движение еще есть.

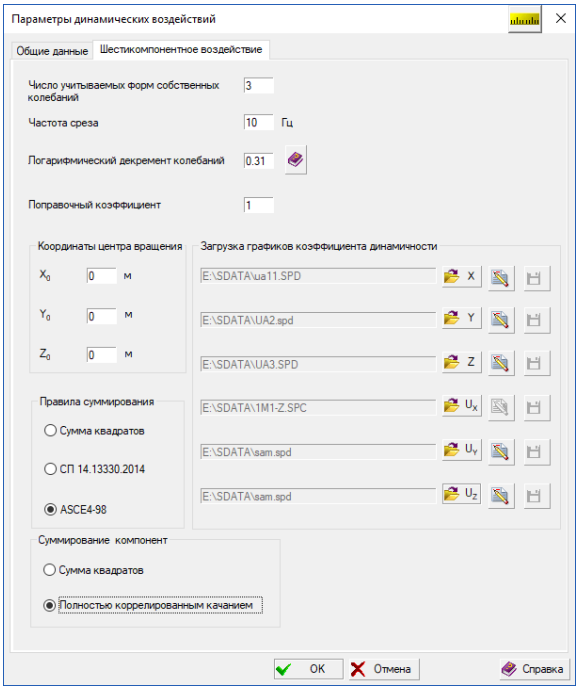



Рис. 8.7-29. *Страница* **Шестикомпонентное воздействие**

Кнопка  активирует диалоговое окно, с помощью которого можно получить справочную информацию о коэффициентах неупругого сопротивления различных конструкций. Выбрав нужный тип конструкции и нажав кнопку **ОК**, можно перенести соответствующую величину коэффициента неупругого сопротивления в данные загружения. Кроме того, если в качестве типа конструкции выбран пункт **Другие типы конструкций**, то введя одно из возможных представлений информации о неупругом сопротивлении (например, логарифмический декремент колебаний) можно получить нужный коэффициент неупругого сопротивления.

## Пульсация ветрового потока

### *Пульсационная составляющая ветровой нагрузки*

Пульсационная составляющая ветровой нагрузки определяет движение конструкции вокруг того смещенного состояния равновесия, которое конструкция принимает под воздействием средней (статической) составляющей ветрового потока (см. разд. 2.4). Интенсивность ветровых пульсаций пропорциональна силе статического ветра, поэтому расчет на ветровые пульсации обязательно требует ссылки на данные о статическом ветре.

Методика расчета на динамическое действие ветровых пульсаций определяется действующим СНиП на основе гипотезы о статистической независимости (отсутствии корреляции) при движении

конструкции по разным формам собственных колебаний. Указанная гипотеза не всегда справедлива и поэтому в Московских городских строительных нормах МГСН и Рукводстве по расчету зданий и сооружений на действие ветра [4] она была скорректирована с целью учета статистического взаимодействия отдельных форм колебаний. Следует заметить, что при этом лишается смысла рассмотрение результатов расчета по какой-либо отдельной форме собственных колебаний.

Для несимметричных расчетных схем бывает необходимо предусмотреть воздействие ветра сначала с одной стороны, а затем с другой. Здесь часто нельзя решить проблему, рассматривая ветровую нагрузку как знакопеременную, поскольку при изменении направления ветра на противоположное меняются значения аэродинамических коэффициентов (см., например, схему 9 из приложения Д к СП 20.13330.2011). При этом приходится рассматривать и два разных динамических загружения.

### Средняя (статическая) составляющая ветровой нагрузки

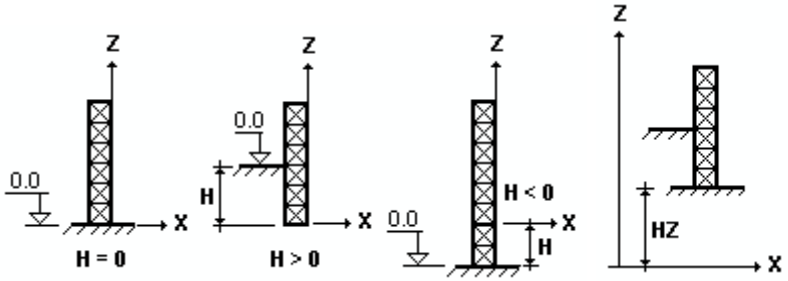



Рис. 8.7-30.

Статическая (или средняя) составляющая ветровой нагрузки описывается отдельным статическим загружением с учетом положения расчетной схемы (рис. 8.7-30). При ее задании используются не только сосредоточенные узловые силы, но и любые местные нагрузки, которые предусмотрены в **SCAD**. Использование распределенных нагрузок позволяет описать ветровое воздействие в соответствии с требованиями норм, согласно схемам ветровых нагрузок с их аэродинамическими коэффициентами (см. Приложение 4 к СНиП 2.01.07-85* и Приложение Д к СП 20.13330.2011).

## Пульсации ветра по СНиП 2.01.07-85*

Характеристики загружений для расчета на ветровые воздействия согласно СНиП 2.01.07-85* назначаются на странице **Пульсационная составляющая ветровой нагрузки по СНиП 2.01.07-85*** (рис. 8.7-31).

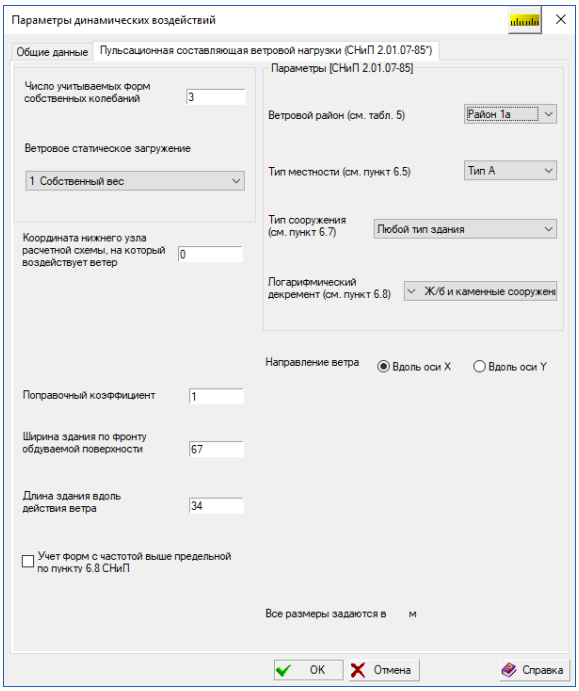



Рис. 8.7-31. *Страница* **Пульсационная составляющая ветровой нагрузки**

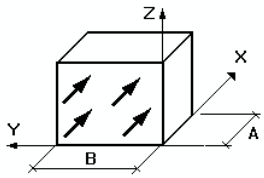



Рис. 8.7-32.

При вводе данных следует обратить внимание на следующее:

- обязательно должно быть задано направление действия ветра;
- в соответствии с заданным направлением необходимо ввести значение ширины здания по фронту обдуваемой поверхности и длины вдоль направления действия ветра (рис. 8.7-32);
- необходимо выбрать из списка номер ветрового статического загружения (именно выбрать, даже если это загружение первое в списке), проверив, что выбранное ветровое статическое загружение соответствует заданному направлению ветра;
- поправочный коэффициент (он по умолчанию задан равным 1) должен быть больше 0.

Число форм собственных колебаний конструкции, которые необходимо учесть в расчете, обычно задается 3 — для плоских конструкций и 6 — для пространственных. Однако существуют и такие конструкции, у которых необходимо учесть гораздо большее число форм.

Например, если первые формы колебаний ортогональны действию ветра. Число учтенных в результате форм может оказаться и меньше, так как, если собственная частота больше предельной частоты рассчитываемого сооружения, то согласно СНиП она не учитывается.

Все другие характеристики задаются путем выбора необходимой строки в списках.

## Пульсации ветра в соответствии с Московскими городскими строительными нормами (МГСН)

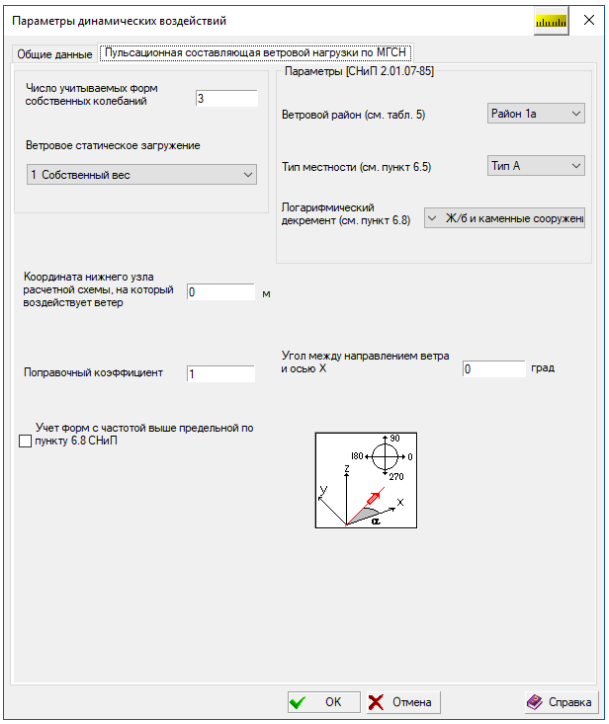



Рис. 8.7-33. *Страница* **Пульсационная составляющая ветровой нагрузки по МГСН**

Характеристики загружений для расчета на ветровые воздействия согласно МГСН назначаются на странице **Пульсационная составляющая ветровой нагрузки по МГСН** (рис. 8.7-33). Расчет выполняется по методике ЦНИИСК им. Кучеренко. При вводе данных следует обратить внимание на следующее:

- обязательно должно быть задано направление действия ветра, в соответствии с которым будут определяться коэффициенты корреляции (см. черт. 3 в СНиП 2.01.07-85*);
- необходимо выбрать из списка номер ветрового статического загружения (именно выбрать, даже если это загружение первое в списке). При этом следует проверить, что выбранное ветровое статическое нагружение соответствует заданному направлению ветра;
- поправочный коэффициент (он по умолчанию задан равным 1) должен быть больше 0.

## Пульсации ветра по СП 20.13330 (Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*)

Характеристики загружений для расчета на ветровые воздействия согласно СП 20.13330 назначаются на странице **Пульсационная составляющая ветровой нагрузки (СП 20.13330.2011, СП 20.13330.2016)** (рис. 8.7-34).

При вводе данных следует обратить внимание на следующее:

- обязательно должно быть задано направление действия ветра (вдоль оси X, вдоль оси Y или в плоскости XoY; в последнем случае величины **По направлению X** и **По направлению Y** определяют вектор направления ветра (необязательно нормированный) в горизонтальной плоскости);
- в соответствии с заданным направлением необходимо ввести значение ширины здания по фронту обдуваемой поверхности и длины вдоль направления действия ветра (рис. 8.7-29);
- необходимо выбрать из списка номер ветрового статического загружения (именно выбрать, даже если это загружение первое в списке);
- поправочный коэффициент (он по умолчанию задан равным 1) должен быть больше 0.



Следует помнить, что при задании статической компоненты ветровой нагрузки уже имелось в виду некоторое направление скорости ветра. Программа не контролирует, соответствует ли «статическое направление» и направление, задаваемое в этом окне. За этим должен проследить пользователь.

Число форм собственных колебаний конструкции, которые необходимо учесть в расчете, обычно задается 3 — для плоских конструкций и 6 — для пространственных. Однако существуют и такие конструкции, у которых необходимо учесть гораздо большее число форм.

Например, если первые формы колебаний ортогональны действию ветра. Число учтенных в результате форм может оказаться и меньше, так как, если собственная частота больше предельной частоты рассчитываемого сооружения, то согласно СП она не учитывается.

Все другие характеристики задаются путем выбора необходимой строки в списках.

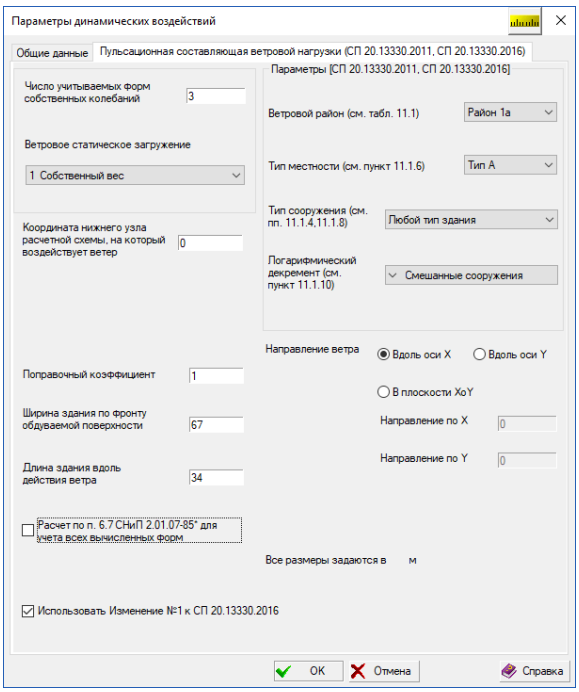



Рис. 8.7-34. *Страница* **Пульсационная составляющая ветровой нагрузки (СП 20.13330.2011, СП 20.13330.2016)**

В СП 20.13330.2016 в п.11.1.8 указано, что для зданий и сооружений, у которых вторая собственная частота меньше предельной, необходимо производить динамический расчет с учетом s форм собственных колебаний. Число *s* следует определять из условия $f_s<f_{lim}< f_{s+1}$. Но при этом не приведены формулы вычисления соответствующих компонент динамической нагрузки. Поэтому предусмотрен специальный маркер **Расчет по п. 6.7 СНиП 2.01.07-85* для учета всех вычисленных форм**, который позволяет использовать для этого случая рекомендации СНиП 2.01.07-85*.

## Импульсное или ударное воздействие

В программе реализованы следующие виды расчетов на ударные и импульсные воздействия:

- удар;
- удар с отслеживанием истории;
- удар с учетом влияния массы ударяющего тела;
- импульс;
- импульс с отслеживанием истории.

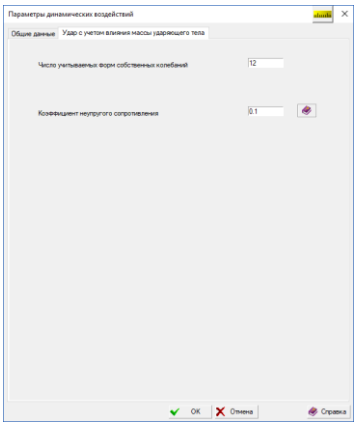



Рис. 8.7-35. *Страница* **Импульсное или ударное воздействие**

Для всех перечисленных выше видов воздействий исходные данные однотипны и задаются на странице диалогового окна (рис. 8.7-35). Здесь следует задать число учитываемых форм колебаний и коэффициент неупругого сопротивления. Кнопка  активирует диалоговое окно, с помощью которого можно получить справочную информацию о коэффициентах неупругого сопротивления различных конструкций (см. рис. 8.7-25).

Для назначения динамических нагрузок используются соответствующие диалоговые окна, которые вызываются нажатием кнопки  в разделе **Загружения** (рис. 8.7-40).

В программе реализованы три модуля расчета на ударные воздействия.

Если масса ударяющего тела мала, то ударное воздействие можно рассматривать как импульс, у которого величина вычисляется следующим образом:

$$S = m\, v_0\, (1 + k_0),$$

где $m$ — масса ударяющего тела;

$v_0$ — скорость в начале удара;

$k_0$ — коэффициент восстановления при ударе, зависящий от свойств соударяющихся тел и принимаемый при отсутствии более точных данных по таблице 5.1 Справочника по динамике сооружений [5].

Поэтому расчет на удар производится как на однократный колоколообразный импульс величиной S. Возможны два варианта расчета:

- в модуле **Удар** по формулам, приведенным в [5] производится оценка максимума, когда импульс задается массой ударяющего тела, его скоростью, временем взаимодействия и коэффициентом восстановления при ударе (эти формулы дают приближенную оценку максимальной реакции конструкции в запас надежности);
- в модуле **Удар с отслеживанием истории** производится отслеживание истории поведения системы (интегрирование уравнений движения способом разложения по формам собственных колебаний) и вычисление максимума. Необходимо понимать, что в этом случае процесс занимает значительно большее время, но позволяет получить более точные оценки максимальных деформаций и усилий. Импульс задается массой ударяющего тела, его скоростью, временем взаимодействия и коэффициентом восстановления при ударе.

Аналогичны различия в модулях **Импульс** и **Импульс с отслеживанием истории**, где реализуется приближенная оценка или же выполняется интегрирование уравнений движения.

Если масса ударяющего тела велика, то используется модуль **Удар с учетом влияния массы ударяющего тела**, и оценка максимума производится без разложения по формам колебаний, при этом в состав движущейся системы включается масса ударяющего тела (предполагается, что имеется только одно ударяющее тело), которая приводится к сосредоточенной в точке удара эквивалентной кинетической энергии по количеству движения. Кроме того, допускается рассматривать непрямой удар, для чего дополнительно задается угол между направлением удара и нормалью к площадке, на которую он действует.

## Модальный анализ

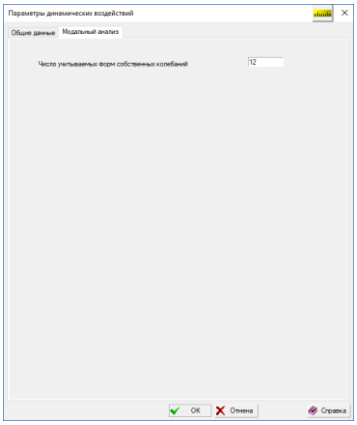



Рис. 8.7-36. *Страница* **Модальный анализ**

На странице **Модальный анализ** (рис. 8.7-36) вводится единственная необходимая для выполнения модального анализа характеристика — число учитываемых форм собственных колебаний.

Если вместо количества форм необходимо указать диапазон поиска частот, то следует воспользоваться методом Ланцоша. Для этого на странице **Общие данные** диалогового окна **Параметры динамических воздействий** активируются два маркера — метод **Ланцоша** и **Анализ в заданном частотном диапазоне**, а также в полях ввода **От** и **До** задаются значения частот начала и конца интервала поиска. При этом количество вычисляемых частот будет не менее заданного на странице **Модальный анализ**.

## Гармонические колебания

При расчете конструкции на гармонические возбуждения может быть решена одна из следующих задач:

- расчет на заданную частоту;
- расчет с учетом пусковых резонансов;
- расчет на заданную частоту с учетом возможной ошибки в определении собственных частот.

В первом случае частота возбуждения предполагается точно заданной и стабильной, учитывается возможность ее взаимодействия со всеми вычисленными собственными частотами конструкции. Соответствующие амплитудные значения действительной и мнимой составляющих инерционных сил при действии гармонической силы определяются по формулам 2.4.13, приведенным в разд. 2.4.

Во втором случае предполагается, что заданная частота достигается путем ее постепенного наращивания от нулевого до заданного верхнего значения и при этом учитывается возможность возникновения резонансных колебаний на собственных частотах, меньших верхнего значения частоты возбуждения.

Наконец, третий случай предполагает, что, в силу приближенности расчетной модели (неточность исходных данных, возможные изменения в расположении масс и т. п.), фактические собственные частоты могут отличаться от вычисленных на величину $\pm \boldsymbol{\varepsilon}$.

Тогда рассматриваются следующие варианты положения заданной частоты $\boldsymbol{\omega}$ по отношению к вычисленным частотам:

- $\omega$ с заданной точностью совпадает с одной из вычисленных частот $\omega_k$ — вычисления производятся для частотного ряда $\omega\frac{\omega_i}{\omega_k}$;
- $\omega \geq \omega_k$ и $\omega < \omega_{k+1}$ — в этом случае принимается два ряда частот $\omega_i - \varepsilon$ и $\omega_i + \varepsilon$;
- $\omega < \omega_1 - \varepsilon$ — принимается ряд частот $\omega_i - \varepsilon$;
- $\omega > \omega_1 + \varepsilon$ — принимается ряд частот $\omega_i + \varepsilon$.

В зависимости от активного маркера **Абсолютная/Относительная** величина $\varepsilon$ может быть задана в абсолютных величинах (например, в Гц) или в относительных (в процентах).

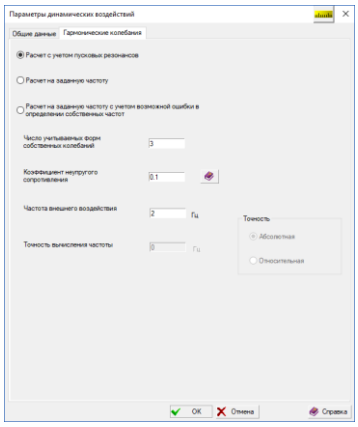


Рис. 8.7-37. *Страница* **Гармонические колебания**

Для каждого из этих рядов «уточненных» собственных частот вычисляются амплитудные значения действительной и мнимой составляющих инерционных сил при действии гармонической силы, которые определяются по формулам 2.4.13, приведенным в разд. 2.4.

Исходные данные задаются на странице **Гармонические колебания** (рис. 8.7-37).

Кнопка  активирует диалоговое окно, с помощью которого можно получить справочную информацию о коэффициентах неупругого сопротивления различных конструкций (см. рис. 8.7-25). Выбрав нужный тип конструкции и нажав кнопку **ОК**, можно перенести соответствующую величину коэффициента неупругого сопротивления в данные загружения.

Кроме того, если в качестве типа конструкции выбран пункт **Другие типы конструкций**, то введя одно из возможных представлений информации о неупругом сопротивлении (например, логарифмический декремент колебаний) можно получить нужный коэффициент неупругого сопротивления.

## Прямое интегрирование уравнений движения

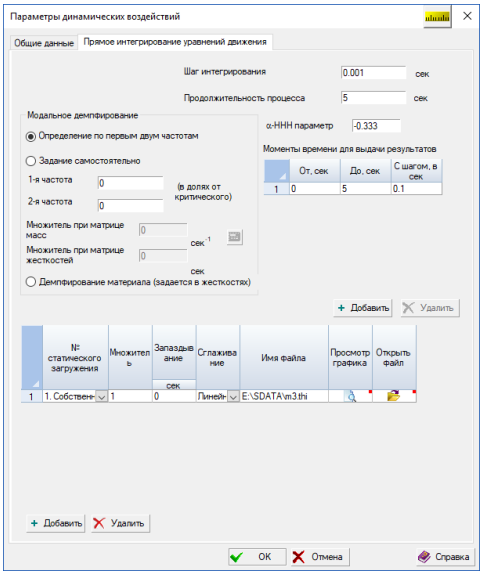


Рис. 8.7-38. *Страница* **Прямое интегрирование уравнений движения**

Для выполнения расчета с использованием прямого интегрирования уравнений движения следует выполнить следующие действия:

- на странице **Общие данные** диалогового окна **Параметры динамических воздействий** в группе маркеров **Вид воздействия** активировать маркер **Прямое интегрирование**;
- задать имя загружения и параметры преобразования статических нагрузок в массы;
- подготовить описание воздействия на странице **Прямое интегрирование уравнений движения** (рис. 8.7-38);
- выйти из диалогового окна нажатием кнопки **ОК**;
- активировать операцию **Параметры динамических нагрузок**  и задать динамические нагрузки в диалоговом окне **Узловая нагрузка во времени**.

Более подробно работа этого модуля динамики описана в главе 15.

Задача нелинейного динамического анализа реализована в двух постановках. И в первой и во второй постановке сначала прикладывается статическая нагрузка, пренебрегая силами инерции и диссипации, и определяется напряженно-деформированное состояние системы. Затем в первой постановке задачи рассматриваются малые линейные колебания относительно положения статического равновесия

$$\begin{cases} \mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}_d + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}_d + \mathbf{K}_t\mathbf{u}_d = \mathbf{p}_d(t) - \mathbf{K}_{21}^t\bar{\mathbf{u}}(t) - \mathbf{C}_{21}\dot{\bar{\mathbf{u}}}(t) \\ \mathbf{u}_d(0) = \dot{\mathbf{u}}_d(0) = 0 \end{cases},$$

$\mathbf{u}_d$ – вектор узловых перемещений, обусловленных действием динамической нагрузки;

**M** – матрица масс;

**C** – матрица демпфирования;

$\mathbf{K}_t$ – матрица тангенциальной жесткости, определяемая по завершению статического расчета и остающаяся постоянной на всем этапе решения динамической задачи;

$\mathbf{p}_d(t)$ – вектор внешних сил динамического нагружения;

$\bar{\mathbf{u}}_d(t)$ – зависящие от времени заданные перемещения;

$\dot{\bar{\mathbf{u}}}_d(t)$ – зависящие от времени скорости, определяемые как производные по времени от заданных перемещений;

$\mathbf{K}^t_{21}$ – подматрица тангенциальной жесткости $\mathbf{K}_t$, охватывающая степени свободы, по которым заданы вынужденные перемещения;

$\mathbf{C}_{21}$ – подматрица диссипации **C**, охватывающая степени свободы, по которым заданы вынужденные перемещения.

Обоснование приведенного выше уравнения для линейной задачи дано в 2.

После решения динамической задачи полное решение определяется как суперпозиция статического решения и динамического:

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{u}_{stat} + \mathbf{u}_d(t), \quad f(t) = f_{stat} + f_d(t),$$

где **u** и $f$ – соответственно полный вектор перемещений и полный силовой фактор (внутреннее усилие, напряжение, деформация в любой точке), $\mathbf{u}_{stat}$ и $f_{stat}$ – вектор перемещений и силовой фактор, обусловленные действием статической нагрузки, $f_d$ – силовой фактор, обусловленный динамической нагрузкой, $t$ – произвольный момент времени.

Во второй постановке задачи рассматриваются нелинейные колебания системы с конечными величинами амплитуд. Поскольку принцип суперпозиции здесь не применим, мы не можем рассмотреть отдельно статическое состояние, затем отдельно – динамическое, а затем наложить одно состояние на другое. Поэтому задача нелинейных колебаний формулируется следующим образом:

$$\begin{cases} \mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + N(\mathbf{u}) + \mathbf{\Gamma}\mathbf{u} = \mathbf{p}_{stat} + \mathbf{p}_d(t) + \mathbf{\Gamma}\bar{\mathbf{u}}(t), \\ \mathbf{u}(0) = \mathbf{u}_0, \quad \dot{\mathbf{u}}(0) = 0, \end{cases}$$

$$\mathbf{p}_d(t) = \sum_{p=1}^{N_p} \mu_p \mathbf{k}^d_p f_p\left(t - t_0^p\right), \quad \bar{\mathbf{u}}(t) = \sum_{s=1}^{M_s} \mu_s \mathbf{k}^d_s f_s\left(t - t_0^s\right).$$

Здесь $\mathbf{u} = \mathbf{u}(t)$ – полный вектор перемещений, обусловленный действием как статической $\mathbf{p}_{stat}$, так и динамической $\mathbf{p}_d(t)$ нагрузки, $\mathbf{u}_0$ – перемещения, полученные в результате решения нелинейной задачи статики $N(\mathbf{u}_0) = \mathbf{p}_{stat}$, $N(\mathbf{u})$ – нелинейный оператор, возвращающий вектор внутренних сил системы. Для физически нелинейных задач тип этого оператора задается принятой теорией пластичности – деформационной или пластического течения. В случае деформационной теории пластичности оператор $N(\mathbf{u})$ определяется диаграммой σ – ε для однородного материала, а для железобетона – диаграммами σ – ε для бетона и арматуры. В случае теории пластического течения оператор $N(\mathbf{u})$ определяется видом заданной поверхности текучести – фон Мизеса для однородного материала и арматуры в случае железобетона и Друкера-Прагера или Гениева – для бетона. Диаграммы σ – ε для однородного материала, бетона и арматуры определяют, как в процессе развития пластических деформаций поверхность текучести будет расширяться (изотропное упрочнение) или сжиматься (разупрочнение – типично для бетона при образовании и раскрытии трещин) и перемещаться в пространстве главных напряжений.

Статическая нагрузка $\mathbf{p}_{stat}$ и неоднородные начальные условия $\mathbf{u}_0$ передаются в динамическую часть задачи автоматически, поэтому **пользователь не должен задавать статическую нагрузку в исходных данных для динамической задачи**.

Динамическая нагрузка $\mathbf{p}_d(t)$ представляется в виде разложения по независящим от времени векторам пространственной конфигурации нагрузки $\mathbf{k}^d_p$, умноженным на функции времени $f_p(t - t_0^p)$, где $t_0^p$ – время запаздывания. Здесь $N_p$ – количество ссылочных загружений, а $p$ – текущий

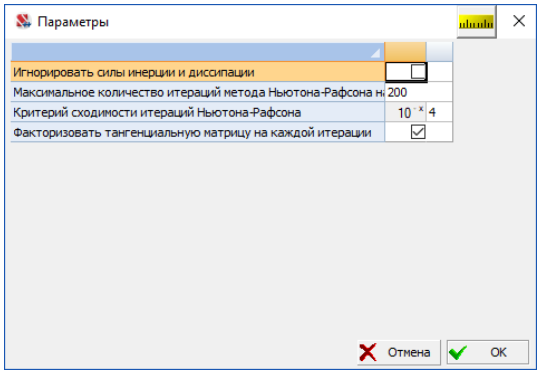
номер статического загружения при расчете на силовые воздействия, задающего пространственную конфигурацию нагрузки $\mathbf{k}^d_p$. Коэффициенты $\mu_p$ играют роль масштабных множителей.

При наличии заданных перемещений используется метод параметров штрафа, в результате чего возникает диагональная матрица $\mathbf{\Gamma}$. При отсутствии заданных смещений $\mathbf{\Gamma} = 0$. Заданные смещения представляются аналогично динамической нагрузке – в виде разложения по независящим от времени векторам пространственной конфигурации нагрузки $\mathbf{k}^d_s$, умноженным на функции времени $f_s(t - t_0^s)$, где $t_0^s$ – время запаздывания, $M_s$ – количество ссылочных загружений, а $s$ – текущий номер статического загружения при расчете на заданные перемещения, задающего пространственную конфигурацию нагрузки $\mathbf{k}^d_s$.

Для активации режима решения нелинейных уравнений движения следует использовать маркер **Нелинейный анализ**.

Предшествующее статическое нагружение задается в окне **Моделирование нелинейных нагрузок**, даже в тех случаях, когда оно было линейным.

Кнопка  позволяет вызвать диалоговое окно и осуществить тонкую настройку параметров нелинейного расчета:




Опция ***Игнорировать силы инерции и диссипации*** позволяет на основе алгоритма, разработанного для нелинейной динамики, решать задачи статики

$$\begin{cases} N(\mathbf{u}) + \mathbf{\Gamma u} = \mathbf{p}_{stat} + \mathbf{p}(t) + \mathbf{\Gamma}\bar{\mathbf{u}}(t) \\ \mathbf{u}(0) = \mathbf{u}_0 \end{cases}.$$

При $\mathbf{p}_{stat} = 0$ в диалоге **Управление шаговым процессом**, вызываемом из узла дерева **Моделирование нелинейных нагрузок**, следует задать только один шаг с коэффициентом загружения равным нулю для инициализации физически нелинейных конечных элементов. При этом $\mathbf{u}_0 = 0$. Такой подход позволяет намного гибче задавать приращение статической нагрузки. Например, можно реализовать такое нагружение: $\mathbf{p}(t) = \mathbf{p}_0 \cdot sin(\pi t/4)$, где $t \in [0, 1]$. Тогда при равномерном шаге $\Delta t$ по квазивременному параметру $t$ приращение нагрузки $\Delta\mathbf{p} \to 0$ при $t \to 1$ (см. Рис. 8.7-39), что может оказаться полезным при приближении к предельной точке кривой равновесных состояний.

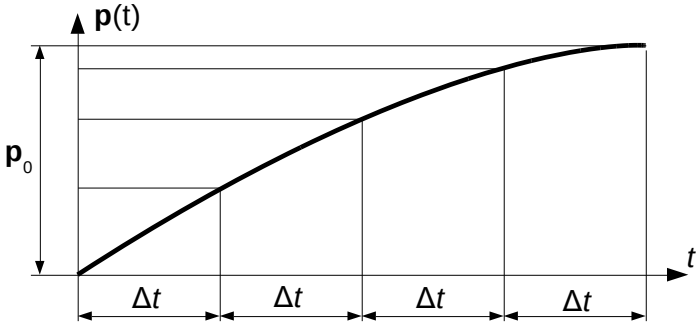



Рис. 8.7-39

Данная опция позволяет также моделировать циклическое нагружение.

Максимальное количество итераций метода Ньютона-Рафсона ограничивает количество итераций, выполняемых упомянутым методом, во избежание зацикливания на данном шаге по времени при отсутствии сходимости итерационного процесса. Если сходимость с заданной точностью, определяемой параметром ***Критерий сходимости итераций метода Ньютона-Рафсона***, достигнута, то итерации прекращаются и происходит переход к следующему шагу интегрирования. Алгоритм решения нелинейной динамической задачи представлен в 1.

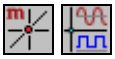
Кнопку **Факторизовать матрицу жесткости на каждой итерации** для задач упруго-пластического деформирования рекомендуется всегда включать, поскольку в противном случае мало шансов обеспечить сходимость метода Ньютона-Рафсона. Отключение этой кнопки приводит к тому, что матрица тангенциальной жесткости вычисляется только один раз в начале каждого шага по времени или по нагрузке.

В случае нелинейного анализа доступна возможность нелинейного динамического анализа прогрессирующего обрушения. Подробно этот вопрос описан в главе 24.

## Литература к разделу Прямое интегрирование уравнений движения


1. Фиалко С.Ю. Применение метода конечных элементов к анализу прочности и несущей способности тонкостенных железобетонных конструкций с учетом физической нелинейности, СКАД СОФТ, Издательский дом АСВ, Москва, 2018.
2. S. Fialko, V. Karpilovskyi. Time history analysis formulation in SCAD FEA software, J. of Measurements in Engineering, 6 (4) 2018 pp. 173 – 180.


## Ввод динамических нагрузок и задание масс



Массы и динамические нагрузки могут быть заданы только в уже созданном динамическом загружении.

Для задания масс используется операция **Инерционные характеристики**  , при вызове которой появляется диалоговое окно **Массы** (рис. 8.7-40). В этом окне следует выбрать способ задания масс (в узлах или на элементы), задать вес массы и ее привязку (привязка задается, если масса назначается как сосредоточенная на элемент), и после выхода из окна привязать массы к узлам и элементам по тем же правилам, что и нагрузки.

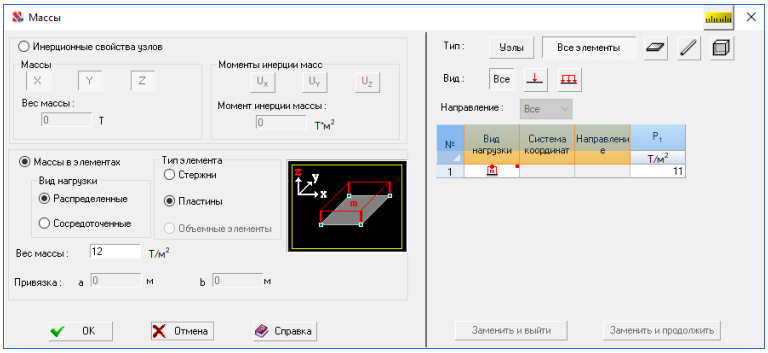


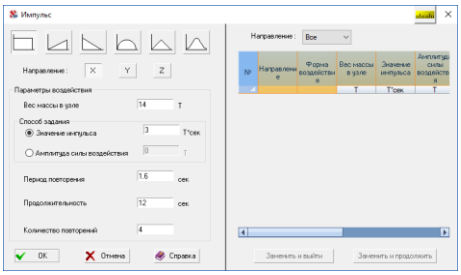

Рис. 8.7-40. *Диалоговое окно* **Массы**

Величина массы характеризуется ее весом и задается в тоннах (или других назначенных для конкретной задачи единицах измерения силы), т. е. в виде произведения массы на ускорение свободного падения.

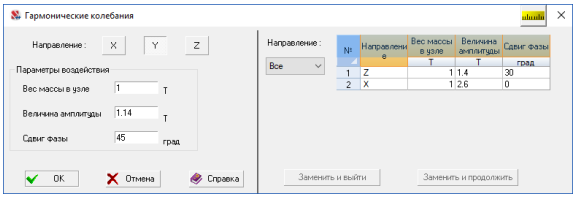
При задании масс в узлах следует назначить направления соответствующих динамических перемещений и значение массы (или момента инерции массы). Перед вводом характеристик масс, приложенных к пластинчатым элементам, необходимо активировать маркер **Пластины**.

В зависимости от типа динамического загружения (импульс, удар, ...) при нажатии кнопки **Параметры динамических нагрузок**  появляется одно из диалоговых окон, изображенных на рисунках 8.7-41, *а–г*.

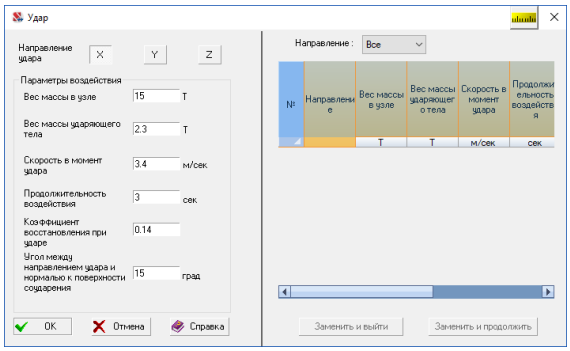
*а)*




*б)*




*в)*




*г)*

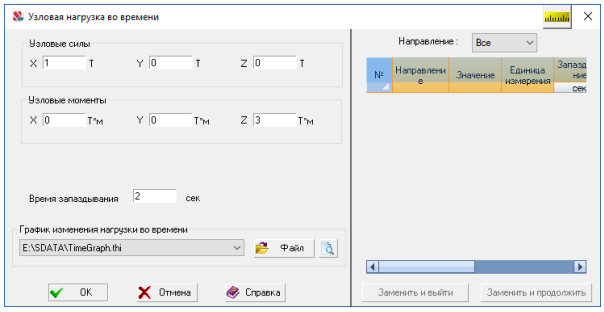



Рис. 8.7-41. *Диалоговые окна задания характеристик динамических нагрузок*
*а)* **Импульс**; *б)* **Гармонические колебания**; *в)* **Удар**; *г)* **Узловая нагрузка во времени**

При назначении нагрузок для различных видов расчета на динамические воздействия следует:

- ввести данные в соответствующем диалоговом окне;
- нажать кнопку **ОК** диалогового окна;
- выбрать на схеме узлы или элементы, в которые приводятся назначенные воздействия;
- нажать кнопку **ОК** в разделе **Загружения**.

После назначения масс или ввода динамических нагрузок необходимо выполнить операцию перезаписи загружения под ранее назначенным динамическому загружению номером.

Заданные параметры динамических нагрузок будут занесены в таблицы соответствующего окна. Порядок корректировки ранее введенных данных не отличается от аналогичных операций при задании других нагрузок:

- указать в таблице строку с корректируемыми параметрами, после чего содержимое строки будет перенесено в поля ввода;
- выполнить корректировку данных;
- использовать кнопки **Заменить и выйти** или **Заменить и продолжить** в зависимости от необходимости внесения изменений в другие данные.

## 8.8. Корректировка параметров загружений/групп нагрузок



С помощью этой операции можно изменить типы загружений, виды нагрузок, коэффициенты надежности и длительности одного или нескольких загружений и/или групп нагрузок. Операции выполняются в двухстраничном диалоговом окне (рис. 8.8-1)

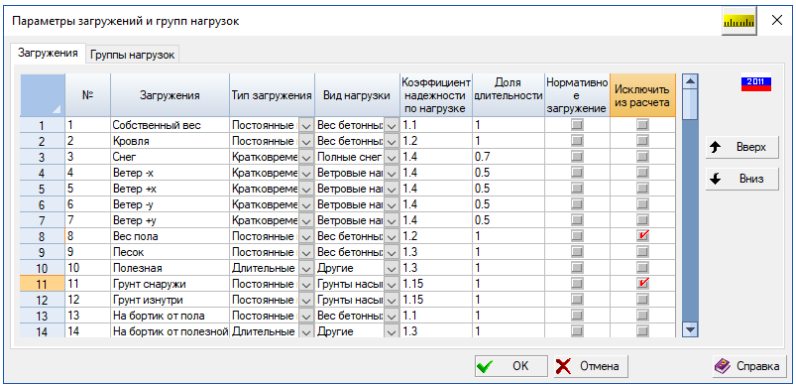



Рис. 8.8-1. *Диалоговое окно* **Параметры загружений и групп нагрузок**

На первой странице содержится таблица с перечнем всех загружений и их параметров, каждый из которых может быть изменен. Аналогично, на второй странице приведена информация о группах нагрузок.

Нумерация загружений и групп нагрузок может быть изменена. Для этого необходимо отметить нужные загружения/группы нагрузок и переместить их по списку на нужное количество позиций нажатием на кнопки **Вверх** или **Вниз**.

В колонке **Исключить из анализа** можно установить маркер, который исключит соответствующее загружение из расчета.

## 8.9. Литература к главе Задание Схем Загружений

1. Динамические расчеты сооружений на специальные воздействия. Справочник проектировщика / Под ред. Коренева Б.Г. и Рабиновича И.М.— М.: Стройиздат, 1981.
2. Егупов В.К., Камандрина Т.А., Расчет зданий на сейсмические воздействия. — Киев: Будивельник, 1969.
3. Поляков С.В. Сейсмостойкие конструкции зданий.— М.: Высшая школа, 1983.
4. Руководство по расчету зданий и сооружений на действие ветра / ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко.— М.: Стройиздат, 1978.
5. Справочник по динамике сооружений. — М.: Стройиздат, 1972. — 511 с.
6. Бирбраер А.Н. Расчет конструкций на сейсмостойкость. – СПб.: Наука, 1988 – 254 с.

# 9. Препроцессор ФОРУМ

## 9.1. Общие принципы создания модели

В отличие от конечно-элементных моделей, где в качестве «кирпичиков», из которых складывается расчетная схема, выступают конечные элементы, в основу модели в препроцессоре **ФОРУМ** положены *укрупненные элементы* (*объекты*), максимально приближенные по своему назначению и наименованию к функциональным составным частям реального сооружения. В их число входят такие наиболее часто используемые объекты, как *колонны*, *балки*, *стены*, *перекрытия* и *крыши*. Группы объектов могут быть объединены в *блоки.* Как правило, объединение выполняется по позиционному принципу, при котором в один блок входят элементы, моделирующие один этаж сооружения или одну секцию многосекционного здания, хотя возможны и другие условия группировки (например, блоком можно объявить все колонны здания).

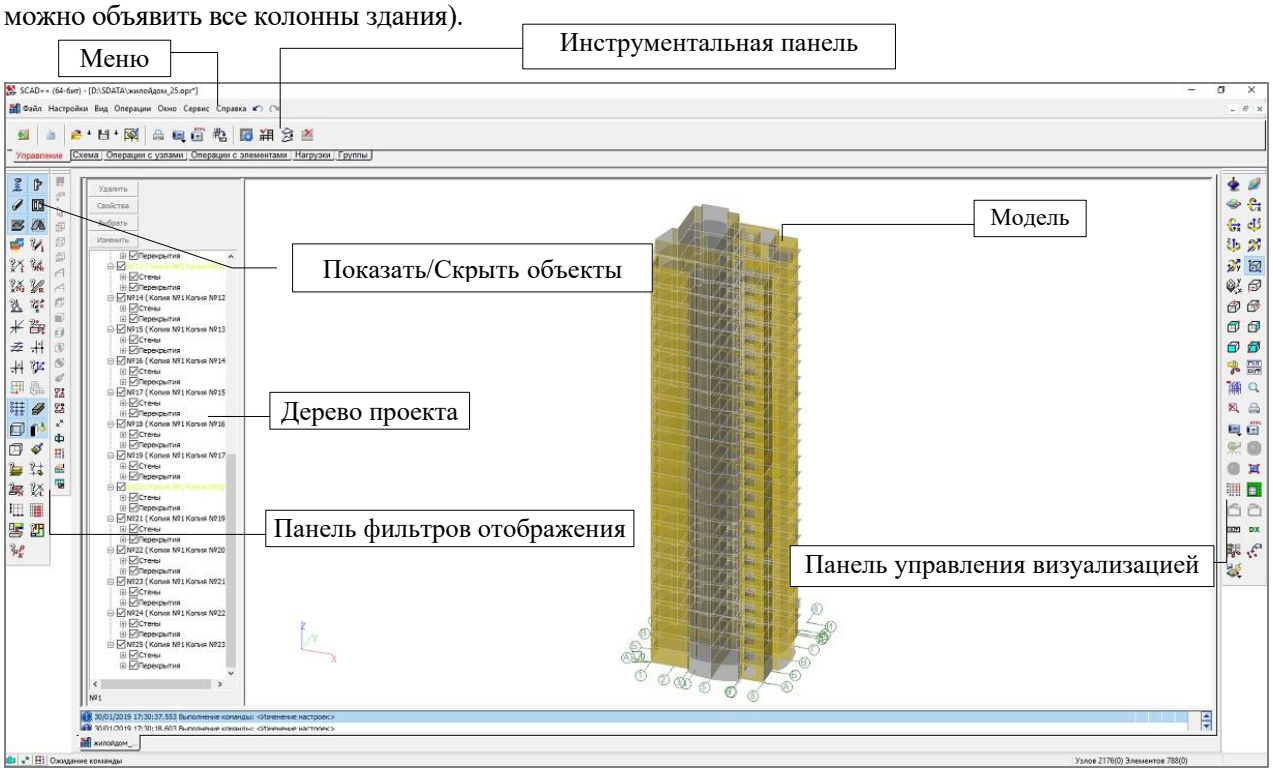



Рис. 9.1-1. *Общий вид рабочего окна препроцессора* **ФОРУМ**

Такой подход к моделированию часто используется в системах автоматизированного проектирования архитектурной части проекта, что создает предпосылки к переходу от архитектурной модели к расчетной и, в какой-то мере, упрощает создание геометрии расчетной схемы, для которой архитектурная модель может служить подосновой.

Очевидным преимуществом укрупненных моделей является их относительная простота по сравнению с соответствующими им конечно-элементными моделями, что значительно облегчает контроль больших схем.

Препроцессор **ФОРУМ**, входящий в состав программы **SCAD++**, предназначен как для формирования укрупненных моделей, так и для «доведения» моделей, импортированных из архитектурных систем.

Наличие укрупненной модели, состоящей из объектов, позволяет автоматизировать процесс объединения конечных элементов в конструктивные элементы (по принадлежности одному объекту) и в группы элементов. Переход от укрупненной модели к конечно-элементной расчетной схеме комплекса **SCAD** выполняется путем автоматического или управляемого пользователем преобразования объектов в наборы конечных элементов.

Управление препроцессором осуществляется с помощью меню, инструментальных панелей, фильтров и диалоговых окон. Для облегчения освоения препроцессора пользователями комплекса

**SCAD** везде, где это было целесообразно, сохранены принятые в **SCAD** правила работы с программой и многие операции. Поэтому описание таких «общих» операций (как удаление и перенос узлов, перенос начала общей системы координат и т. п.) в этом разделе не приводится.

### Инструментальная панель

Инструментальная панель содержит разделы: **Управление**, **Схема**, **Операции с узлами**, **Операции с элементами**, **Нагрузки** и **Группы**. Переключение разделов выполняется указанием курсора на «закладки» с наименованиями разделов.

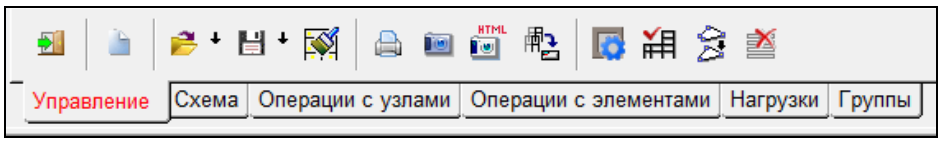



Рис. 9.1-2. *Раздел* **Управление** *инструментальной панели*

Раздел **Управление** (рис. 9.1-2) включает следующие операции:

 — **Выход** — завершение работы с программой;

 — **Новый проект** — создание нового проекта;

 — **Открыть проект** — загрузка существующего проекта;

 — **Сохранить** — сохранение проекта под текущим именем;

 — **Упаковка данных** — исключение из проекта удаленных узлов и элементов, узлов, не принадлежащих элементам, «пустых» блоков (блоков, не содержащих элементов);

 — **Печать** — вывод на печать установленного на экране изображения модели (или ее фрагмента);

 — **Сохранение образа экрана** — текущее отображение схемы сохраняется в формате Windows метафайла (в файле с расширением **.emf** или **.wmf**) или растровом формате (**.bmp**, **.png**, ...) и может использоваться, например, при подготовке отчета;

 — **Сохранение текущего отображения расчетной схемы в формате HTML** — текущее отображение схемы сохраняется в формате HTML и может использоваться, например, для размещения в Интернете;

 — **Сохранение фрагмента схемы** — сохранение фрагмента модели в качестве самостоятельного проекта;

 — **Настройки** — назначение единиц измерения и формы представления числовой информации, выбор шрифтов, ...;

 — **Экспресс-контроль схемы** — экспресс-контроль некоторых параметров модели;

 — **Корректировка элементов** — удаляются или заменяются некорректные (с точки зрения формы) элементы;

 — очистка списка сообщений.

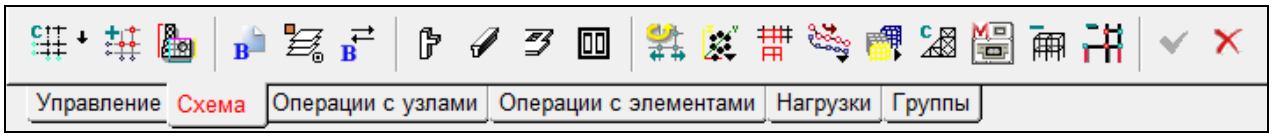



Рис. 9.1-3. *Раздел* **Схема** *инструментальной панели*

Из раздела **Схема** (рис. 9.1-3) вызываются следующие операции:

— **Задание сетки разбивочных осей** — ввод параметров разбивочных осей;

— **Генерация узлов на сетке** — задание области ввода узлов в точках пересечения разбивочных осей;

— **Создание стандартных конструкций** — таких, как лестничная клетка, ферма, например;

— **Создать блок** — ввод параметров и создание нового блока;

— **Управление блоками** — таблица с перечнем блоков, аналогичная таблицам управления группами узлов и элементов;

— ввод колонн, балок, плит перекрытий и стен, соответственно;

— **Геометрические преобразования**;

— **Копирование** — копирование блоков и элементов;

— **Копирование фрагмента схемы**;

— Создание и корректировка **траектории**;

— Сборка схемы из нескольких схем (**Режим сборки**);

— **Генерация результирующего проекта** — автоматическое формирование сетки конечных элементов;

— **Экспорт данных в Монолит**;

— **Удаление данных модели**;

— **Удаление выбранных объектов** — удаление выбранных узлов и элементов;

— **Операции над блоками** — перенос элементов из одного блока в другой;

— **Подтверждение (OK)** — команда выполнения выбранной операции;

— **Отказ** — сброс выбранной операции.

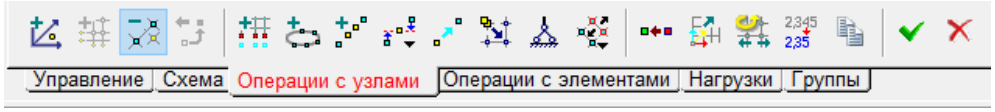



Рис. 9.1-4. *Раздел инструментальной панели* **Операции с узлами**

Раздел инструментальной панели **Операции с узлами** (рис. 9.1-4) включает следующие операции:

— **Ввод узлов** — ввод узлов путем задания их координат;

— **Генерация узлов на сетке** — задание области ввода узлов в точках пересечения разбивочных осей;

— **Удаление узлов**;

— **Восстановление удаленных узлов**;

— **Ввести узлы на заданном расстоянии от отмеченных** — создание новых узлов на заданном расстоянии от отмеченных узлов;

— **Генерация узлов по дуге** — ввод узлов, расположенных по дуге окружности, лежащей в заданной плоскости;

— **Ввод дополнительных узлов между узлами** — ввод узлов, которые дробят участок между существующими узлами по заданному правилу;

— **Перенос узлов в заданную плоскость**;

— **Перенос узлов** — перенос выбранных узлов на заданное расстояние;

— **Сведение совпадающих узлов** — удаление узлов, координаты которых совпадают с координатами ранее введенных узлов;

— **Установка связей в узлах** — операция аналогична одноименной операции, описанной в разделе 7.4;

— **Объединение перемещений** в узлах — операция аналогична одноименной операции, описанной в разделе 7.4;

— **Замена узла в элементах**;

— **Перенос начала координат**;

— **Геометрические преобразования**;

— **Округление координат узлов**;

— **Копирование свойств узла**;

— **Подтверждение (OK)** — команда выполнения выбранной операции;

— **Отказ** — сброс выбранной операции;




Рис. 9.1-5. *Раздел инструментальной панели* **Операции с элементами**

Раздел инструментальной панели **Операции с элементами** (рис. 9.1-5) включает следующие операции:

— **Удаление элементов**;

— **Восстановление удаленных элементов**;

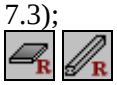
— **Удаление совпадающих элементов** — удаление элементов одного вида, все узлы которых совпадают с узлами ранее введенных элементов;

— **Перенос элементов** — перенос выбранных элементов на заданное расстояние;

— **Назначение коэффициентов упругого основания** (см. раздел 7.3);

 — **Задание ориентации местных осей координат элементов** — разворот сечения элемента на заданный угол;

 — **Переход к напряжениям вдоль заданного направления для пластин** (см. раздел 7.3);

 — **Изменение жесткостных характеристик** — изменение жесткостных характеристик выбранных элементов;

 — перенумерация жесткостей;

 — задание схемы армирования пластинчатых элементов (см. главу 19);

 — задание схемы армирования стержней (см. главу 19) ;

 **— Установка шарниров и удаление шарниров —** назначение и удаление шарниров и ползунов;

 **— Установка или удаление абсолютно жестких вставок**;

 **— Смещение срединной плоскости пластин** — изменение положения плиты или стены путем параллельного переноса ее срединной плоскости на заданное расстояние;

 — **Разбивка стержня** — деление балок и колонн на несколько элементов;

 — **Дробление стержней с учетом промежуточных узлов** — дробление балок и колонн на несколько элементов с учетом всех пересекаемых ими узлов;

 — **Раздробить стержни в точке пересечения**— разбиение пересекающихся элементов;

 — **Сведение стен и перекрытий** — «подтягивание» стен до линии их пересечения (в том числе и с перекрытиями);

 — **Корректировка описаний проемов** — объединение пересекающихся проемов;

 — **Удаление проемов** — удаление проемов в элементах плит и стен;

 — **Продолжить стержень до пластины** — «подтягивание» стержня к указанному плоскостному элементу;

 **— Сопряжение стержней** — продление стержней до точки пересечения;

 — **Дробление стержней полигоном**;

 — **Расширение плиты отступом от граней** — увеличение габаритных размеров плиты путем отступа от всех ее граней на заданное расстояние;

 — Разбиение перекрытий и стен балками и колоннами, лежащими в их плоскости;

 — **Дробление пластин по линии пересечения** — разбиение пересекающихся плоскостных элементов по линиям пересечения;

 — **Операции с парой плоскостных объектов** — объединение, пересечение, ... пластинчатых элементов, лежащих в одной плоскости;

 — **Создание поверхностей вращения** — формирование поверхностей типа цилиндр, конус и сфера из плоскостных элементов;

 **— Ввод элементов по дуге** — ввод балок по дуге окружности;

 — **Изменение типов элементов** — возможность изменить тип элемента (стены, перегородки, колонны, перекрытия, крыши);

 — **Ввод 0-элементов**;

 — **Ввод связей конечной жесткости** — ввод и назначение параметров связей конечной жесткости;

 — **Ввод упругой связи** — ввод и назначение параметров упругих связей;

 — **Ввод одноузловых законтурных элементов плиты** — ввод и назначение параметров одноузловых законтурных элементов плиты на упругом основании;

 — **Ввод двухузловых законтурных элементов плиты** — ввод и назначение параметров двухузловых законтурных элементов плиты на упругом основании;

 — **Ввод вантовых элементов** — ввод и назначение параметров вантовых элементов;

 — **Твердые тела** — ввод, корректировка и назначение параметров абсолютно твёрдых тел;

 — **Ввод односторонних связей** — ввод и назначение параметров односторонних связей;

 — Копирование свойств элемента;

 — **Подтверждение (OK)** — команда выполнения выбранной операции;

 — **Отказ** — сброс выбранной операции.

## Нагрузки

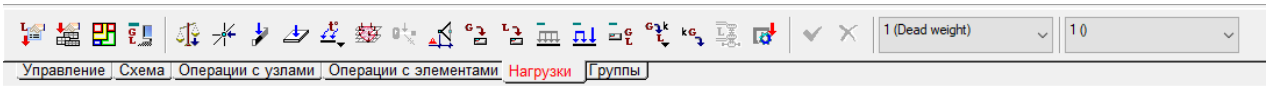



Рис. 9.1-6. *Раздел инструментальной панели* **Нагрузки**

Раздел инструментальной панели **Нагрузки** (рис. 9.1-6) включает следующие операции:

 — **Параметры режима задания нагрузок**;

 — **Таблицы нагрузок**;

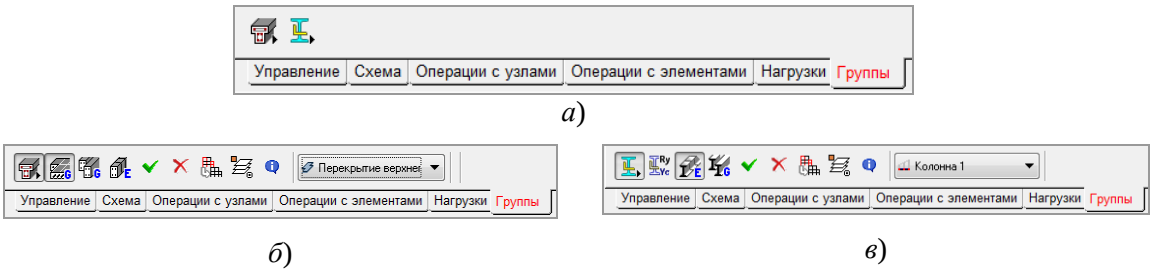
 — **Назначение типов помещений**;

 — **Удаление нагрузок**;

 — **Подтверждение (OK)** — команда выполнения выбранной операции;

 — **Отказ** — сброс выбранной операции.

**Группы**




*а*)

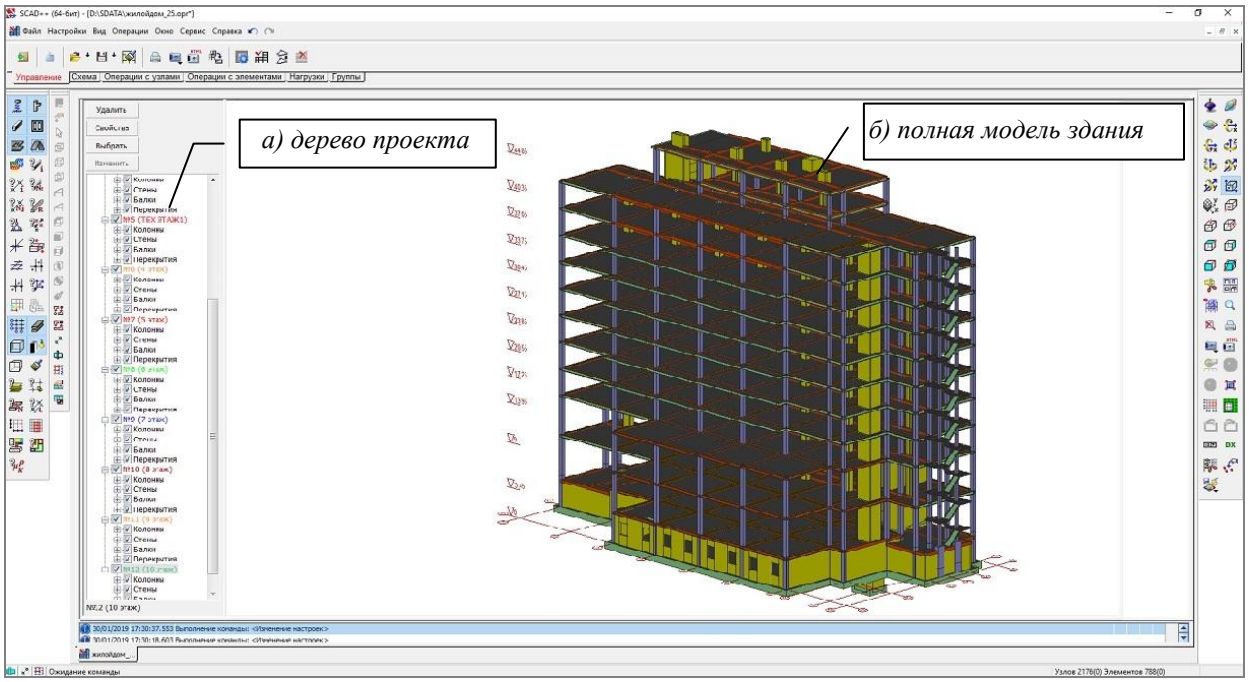
*б*) *в*)

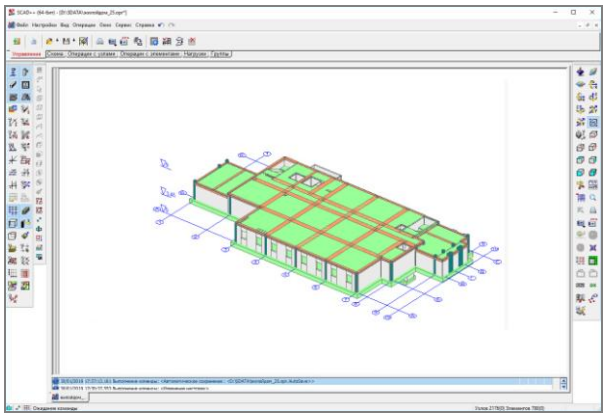
Рис. 9.1-7. *Раздел инструментальной панели* **Группы** (*а*), инструментальные панели для задания конструктивных групп элементов ж/б (*б*) и стальных (*в*) конструкций

Раздел инструментальной панели **Группы** (рис. 9.1-7) включает две операции — для задания конструктивных групп элементов ж/б и стальных конструкций. Описание правил формирования и работы с соответствующими конструктивными группами приведено в разделах 19 и 20.

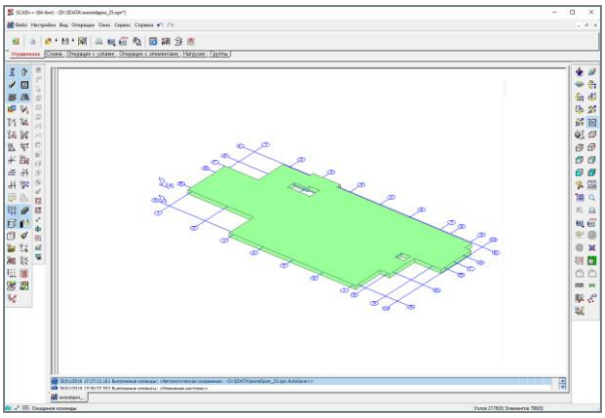
## 9.2. Структура модели

В общем виде модель объекта представляется в виде четырехуровневой древовидной структуры — «модель» (рис. 9.2-1, *б*), «блок» (рис. 9.2-1, *в*), «группа однотипных элементов», «элемент» (рис. 9.2-1, *г*). Блоки и элементы могут иметь уникальные имена (идентификаторы). Кроме того, элементы имеют порядковые номера в составе модели. Описание особенностей представления данных на каждом уровне и возможные операции с объектами этих уровней описаны ниже.





*в*) блок (этаж)



*г*) элемент (перекрытие)

Рис. 9.2-1. *Структура модели*

Структуризация дает возможность создавать модель как совокупность конструктивных элементов определенного типа, сохраняя за элементами (в том числе и конечными) признак принадлежности к конкретному конструктивному элементу на всех этапах преобразования — формирования расчетной схемы, расчета, анализа результатов и конструирования.

Структура модели отображается в виде дерева проекта (рис. 9.2-1, *а*), которое строится автоматически по ходу формирования модели.

### Узлы

Позиционирование элементов в модели выполняется путем их привязки к *узлам*. Узлы могут вводиться в модель как точки пересечения *разбивочных* (координационных) *осей* или с помощью операций ввода узлов.

### Блоки

Блоки могут иметь разный физический смысл, например этажи, отдельно стоящие части сооружения, части здания, разделенные температурным швом и т. п. Наличие в модели, по крайней мере, одного блока является обязательным. Перед тем, как в модель будут введены элементы, должен быть создан блок, в который эти элементы входят. В некоторых случаях блоки создаются автоматически. Это происходит при создании новой модели, выполнении операции копирования блока, а также при импорте данных из архитектурных систем (например, ArchiCAD®).

### Элементы

В зависимости от назначения модели, в сооружении различают пять типов объектов (элементов): ***колонна***, ***балка***, ***стена***, ***перекрытие*** и ***крыша***. Первые два типа являются двухузловыми объектами, и в конечно-элементной расчетной схеме моделируются стержнями. Три последних — плоскостные и могут иметь произвольное число узлов, включать внутренние контуры, моделирующие проемы и отверстия, и в процессе преобразования в расчетную схему разбиваются на трех- и четырехузловые элементы оболочки (по умолчанию), плиты или балки-стенки.

Объекты типа ***крыша*** (покрытие) могут попасть в модель при импорте данных из систем архитектурного проектирования или при вводе перекрытий (кнопка **Перекрытие/крыша**). В отличие от перекрытий в **ФОРУМе** не предусмотрена возможность задания нагрузки на крыши. Если необходимо задать такие нагрузки, это следует сделать в конечно-элементной модели.

В препроцессоре **ФОРУМ** положение элементов в модели традиционно вертикальных (колонна, стена) или горизонтальных (перекрытие, балка) не контролируется, что позволяет «положить» стену или колонну или «поставить» перекрытие вертикально.

При задании элементов выполняется ввод их геометрических параметров и характеристик материала, из которого они изготовлены. В программе предусмотрена возможность копирования свойств ранее введенных элементов при вводе новых, а также корректировка геометрии элементов.

## 9.3. Создание новой модели

При создании новой модели рекомендуется следующий порядок выполнения операций:

- на странице **Управление** инструментальной панели нажать кнопку **Новый проект** —  ;
- в диалоговом окне **Новый проект** ввести идентификационные данные проекта и назначить единицы измерения основных величин (здесь и далее подразумевается, что выход из диалогового окна после ввода данных выполняется нажатием кнопки **ОК**);
- в диалоговом окне **Сохранить как…** ввести имя файла, в котором будет сохраняться проект;
- на странице **Схема** инструментальной панели нажать кнопку **Задание сетки разбивочных осей** —  ;
- в диалоговом окне **Задание сетки разбивки** задать параметры осей;
- на странице **Схема** инструментальной панели нажать кнопку **Генерация узлов на сетке** —  ;
- в диалоговом окне **Ввод узлов на пересечении разбивочных осей** назначить границы участка, в рамках которого на пересечениях осей будут создаваться узлы;
- на странице **Схема** инструментальной панели нажать кнопку **Создать блок** —  ;
- в диалоговом окне **Параметры блока** задать имя блока и назначить цвет, которым блок будет отображаться на модели. После выполнения этой операции в дереве проекта появится секция (пока пустая) с элементами нового блока;
- на странице **Схема** инструментальной панели нажать кнопку с изображением вводимого элемента (например, колонны) —  ;
- в диалоговом окне **Жесткость стержневых элементов** задать параметры элемента (материал, форма и размеры сечения, правила ввода);
- ввести элемент.

Если модель состоит из нескольких блоков, то после ввода элементов, входящих в текущий блок, следует создать новый блок и повторить операции ввода элементов.

### Новый проект



Создание нового проекта в препроцессоре **ФОРУМ** аналогично созданию нового конечно-элементного проекта. Нужно лишь в диалоговом окне **Новый проект** (рис. 9.3-1) указать тип **ФОРУМ**.

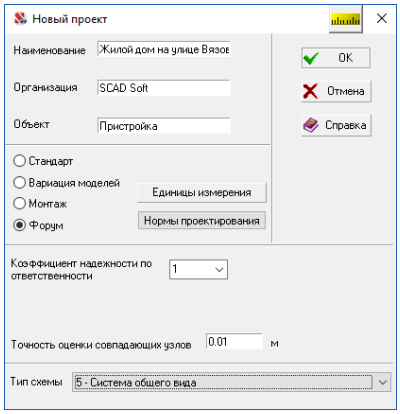



Рис. 9.3-1. *Диалоговое окно* **Новый проект**

## Создание нового блока



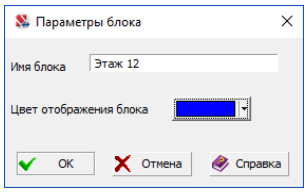



Рис. 9.3-2. *Диалоговое окно* **Параметры блока**

Формирование модели в препроцессоре **ФОРУМ** начинается с создания блока (кнопка в разделе **Схема**). В появившемся диалоговом окне **Параметры блока** (рис. 9.3-2) задаются имя и цвет отображения.

Блок может быть создан на любом шаге формирования модели. Вновь созданный блок автоматически становится **активным**, т. е. в него будут включаться все элементы, которые вводятся непосредственно после создания блока.

Здесь следует отметить, что при вводе элементы всегда попадают только в активный блок, имя которого выделяется в дереве проекта. Для того чтобы сделать блок активным, достаточно указать курсором на его имя в дереве проекта.

Редактирование параметров (имени и цвета) активного блока возможно по нажатии кнопки **Свойства** в верхней части панели **Дерево проекта** (разд. 9.7).

## Ввод элементов

Как уже отмечалось выше, в программе предусмотрен ввод пяти типов элементов: *колонны*, *балки*, *перекрытия, стены* и *крыши*. Для каждого типа элемента необходимо задать физико-механические характеристики материала и геометрические параметры. Кроме того, каждый элемент может иметь идентификатор (имя). Порядковые номера элементов в модели присваиваются автоматически в процессе ввода.

### *Колонны*



После активации операции ввода колонн появляется диалоговое окно **Жесткость стержневых элементов** (рис. 9.3-3). На странице **Общие данные** этого окна задается марка колонны (или группы колонн), назначается вид сечения (параметрическое, стальной прокат, ...), определяется способ ввода (с фиксированной высотой или по двум узлам). Назначение параметров (форма сечения и физические свойства) практически не отличается от операции назначения жесткостей стержневых элементов в конечно-элементной модели (см. раздел 7.1).

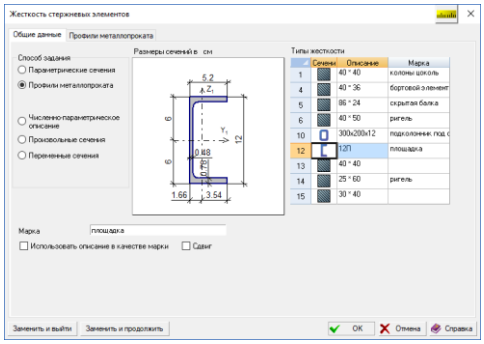



Рис. 9.3-3. *Диалоговое окно* **Жесткость стержневых элементов**

Ввод колонны на модели можно выполнить двумя способами. Если активна опция **Высота колонны**, то ввод выполняется указанием на один узел привязки колонны, а высота колонны определяется значением, записанным в поле ввода (при отрицательном значении — колонна будет направлена от точки привязки вниз). Если в меню **Выбор типа курсора** активна опция **Немедленное выполнение**, то ввод колонны и ее отображение на экране будут выполняться немедленно после указания курсором на узел привязки. Естественно, что вводимые таким способом колонны всегда вертикальны.

Активная опция **Высота колонны определяется при вводе** означает, что колонна будет вводиться путем привязки к двум узлам (от первого узла ко второму протягивается «резиновая нить»). При этом способе ввода контроль положения колонны (вертикальная или наклонная) не выполняется, что позволяет при необходимости реализовать нестандартные ситуации. При использовании данного способа ввода колонн можно использовать маркер **Ввод последовательности**. При вводе последовательности производится добавление цепочки колонн. Ввод будет продолжаться до тех пор, пока курсором не будет нажата кнопка  инструментальной панели (или клавиша **Enter** на клавиатуре). Маркер **С учетом промежуточных узлов** позволяет не только ввести новые колонны,

но и автоматически разделить каждую из них на несколько элементов с учетом всех промежуточных узлов, лежащих по линии колонны.

### Балки



Ввод балок выполняется аналогично вводу колонн, но всегда по двум узлам, между которыми протягивается «резиновая нить». Ограничений на положение балки в модели нет.

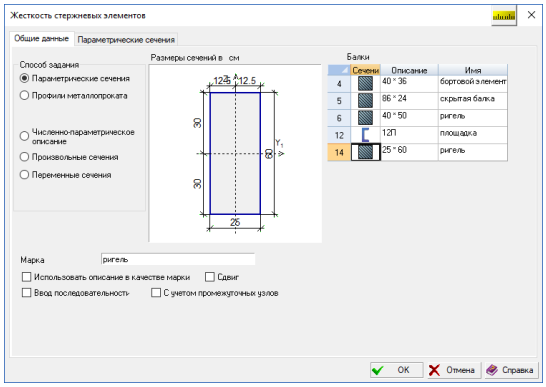



Рис. 9.3-4. *Страница*
**Параметры балок**

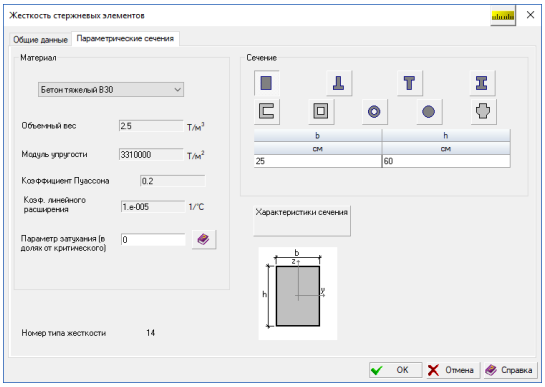



Рис. 9.3-5. *Диалоговое окно*
**Характеристики перекрытия**

### Перекрытия



Перекрытие вводится как *плоский* многоузловой элемент произвольной формы. Ввод осуществляется с помощью «резиновой нити», которая протягивается от узла к узлу и завершается повторным указанием на первый узел перекрытия. Положение перекрытия в модели не контролируется — его можно сделать наклонным и даже вертикальным. Это позволяет использовать элемент перекрытия для ввода элементов крыш и даже стен. Внутри контура перекрытия могут быть отверстия и проемы, форма и количество которых не лимитируются.

После активации операции ввода перекрытия появляется диалоговое окно **Характеристики перекрытия/крыши (плиты)** (рис. 9.3-5). В этом окне задается марка перекрытия (или группы перекрытий), назначается его толщина и материал. В окне расположена таблица с параметрами ранее введенных перекрытий.

В тех случаях, когда предполагается автоматическое задание нагрузок (см. раздел 9.9), необходимо задать **Тип помещения**, к которому относится вводимое перекрытие. Тип выбирается из одноименного выпадающего списка.

Перекрытие может быть задано путем выбора стержней, образующих его контур. В этом случае перед выполнением рассматриваемой операции следует выбрать необходимые стержневые элементы и активировать маркер **Ввод выбранными стержнями** (рис. 9.3-5). Перекрытие будет сформировано после выхода из диалогового окна по кнопке **OK**.

Выбранные стержневые элементы должны отвечать следующим требованиям:

- лежать в одной плоскости;
- иметь ненулевую длину;
- не иметь разрывов, т. е. образовывать замкнутую линию без самопересечений.

### Стены



Стена вводится как *плоский* многоузловой элемент произвольной формы. Ввод стены на модели можно выполнить тремя способами. В *первом* случае это делается с помощью «резиновой нити» указанием на все узлы стены и завершается повторным указанием на первый узел. В этом случае положение стены в модели не контролируется.

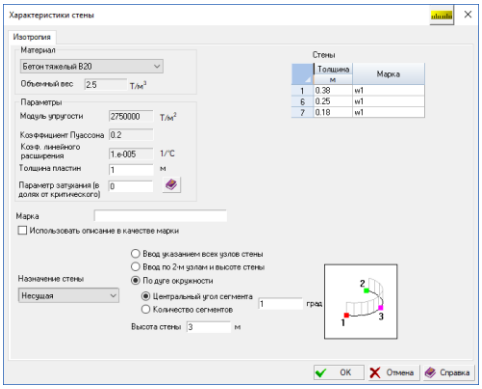



Рис. 9.3-6. *Диалоговое окно* **Характеристики стены**

Во *втором* случае рассматривается стена с фиксированной высотой, для ввода которой достаточно указать только два узла (между ними протягивается «резиновая нить»).

*Третий* способ ввода стен — по дуге окружности. В этом случае стена рассматривается как набор прямоугольных сегментов, количество которых зависит от заданных параметров. Для ввода стены следует указать три узла (в начале, конце и на дуге) и нажать кнопку **ОК** в инструментальной панели. Ввод параметров стены и выбор способа ввода выполняется в диалоговом окне **Характеристики стены** (рис. 9.3-6), которое появляется после активации операции ввода. В этом окне задается марка стены (или группы стен), назначается ее толщина и материал.

Внутри контура стены могут быть отверстия и проемы, форма и количество которых не лимитируется.

В тех случаях, когда предполагается автоматическое задание нагрузки (см. раздел 9.9), для стен необходимо установить признак **Несущая** или **Перегородка** в списке **Назначение стены**. Это обеспечит формирование модели, учитывающей соответствующие свойства стены. В случае перегородки в расчетную модель попадет только нагрузка.

В окне расположена таблица с параметрами ранее введенных стен.

## Копирование схемы и блоков



Операция позволяет выполнить копирование схемы или ее фрагмента с учетом установленных правил копирования блоков и активных маркеров управления копированием. В целом набор маркеров управления в диалоговом окне **Копирование схемы** (рис. 9.3-7) аналогичен используемым при копировании конечноэлементных моделей (см. раздел 5.14).

При копировании схемы предусмотрены четыре варианта работы с блоками:

- **Каждый блок - в новый блок** — каждый блок исходной схемы порождает **n** новых блоков, где **n** — количество копий;
- **Каждый блок - в исходный блок** — все копии элементов каждого исходного блока записываются в соответствующие позиции (по типам) в «свой» исходный блок;
- **Все блоки - в новый блок** — все копии элементов исходных блоков записываются в соответствующие позиции (по типам) в один, автоматически сформированный, новый блок;
- **Все блоки - в указанный блок** — все копии элементов каждого исходного блока записываются в соответствующие позиции (по типам) в существующий блок, выбранный из списка.

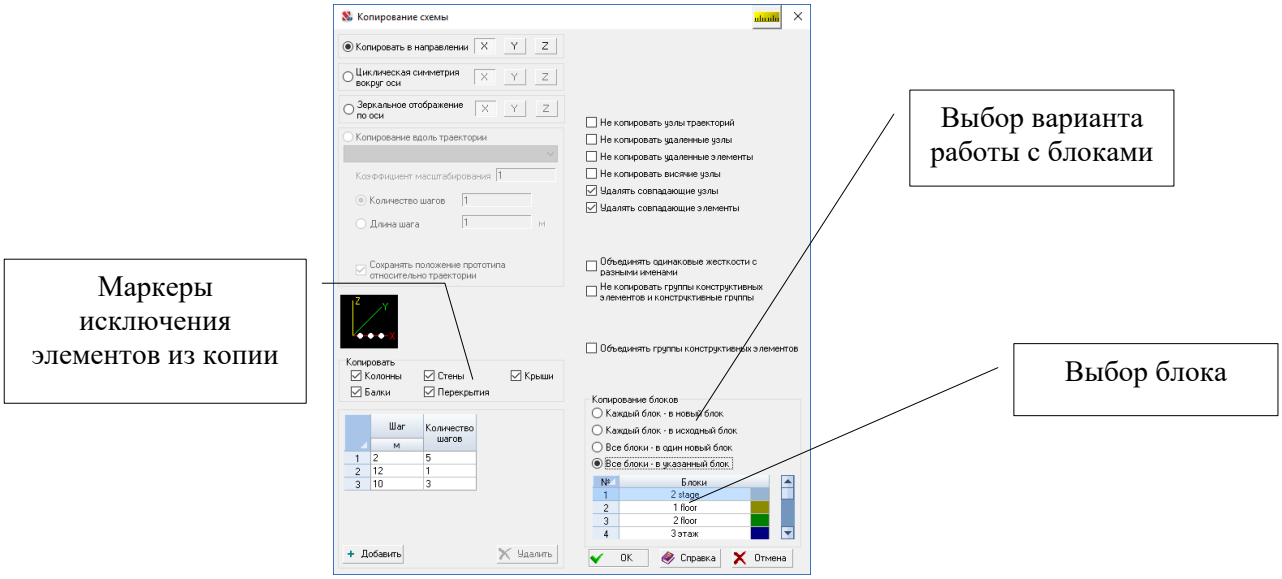



Рис. 9.3-7. *Диалоговое окно* ***Копирование схемы***

При копировании узлов, колонн и балок предусмотрена возможность преобразования типа выбранных объектов по следующим правилам:

- если в схеме-прототипе были выбраны узлы, из каждого такого узла порождается стержневой элемент типа балка, соединяющий его с узлом-аналогом на копии;
- если в схеме-прототипе были выбраны элементы колонн и/или балок, то каждый выбранный стержень будет порождать элемент перекрытия, размер которого в направлении копирования будет равен заданному шагу копирования.

Следует учесть, что тип элемента после копирования выбранных стержней не зависит от типа прототипа, и при необходимости может быть изменен с помощью одноименной операции в инструментальной панели **Операции с элементами** —  .

Жесткостные характеристики элементов, полученных в результате преобразования типа, задаются по традиционным правилам с использованием операций изменения жесткостей —  и  для пластин и стержней соответственно.

Если в схеме выбраны плоскостные элементы, то преобразование типа не выполняется, и элементы копируются в соответствии с установленными настройками.

Из копии могут быть исключены заданные типы элементов. Для этого необходимо деактивировать соответствующие маркеры (по умолчанию копирование выполняется для элементов всех типов).

Если выполнена фрагментация схемы или в исходной схеме с помощью фильтров выключено отображение некоторых типов элементов, при инициации операции появляется выпадающее меню, в котором предлагается выбрать объект копирования — вся схема или видимый фрагмент. В первом случае, т.е. когда в качестве объекта копирования выступает вся схема, операция по приведенным выше правилам будет применена ко всем узлам и элементам схемы, независимо от того, входят они в видимый фрагмент или нет. В случае копирования видимого фрагмента указанные выше действия будут выполняться только с узлами и элементами фрагмента, и для выбранных узлов и элементов будут доступны операции преобразования типов.

Программа не присваивает блокам имена, а только порядковые номера. Если блоки были именованы (кнопка **Свойства** в **Дереве проекта**), то в процессе копирования эти имена сохраняются и для копий, а меняются только номера новых блоков. Назначение блокам имен и цвета выполняется пользователем.

Копирование выполняется после выхода из диалогового окна нажатием на кнопку **ОК**.

## Копирование фрагмента схемы



Кроме копирования полной схемы возможно и копирование её фрагмента. В отличие от описанной выше операции, где речь идет о копировании выделенного (изолированного) фрагмента, здесь рассматривается любая часть схемы, состоящая из выбранных (отмеченных) элементов. При копировании отмеченного фрагмента не выполняется преобразование типа выбранных объектов. В остальном, правила копирования совпадают с правилами копирования полной схемы.

## Перенос элементов из одного блока в другой



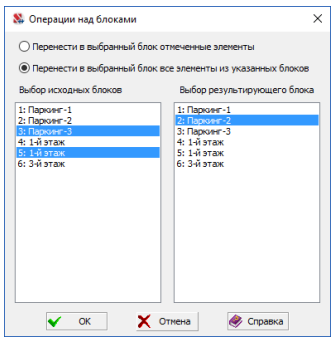



Рис. 9.3-8. *Диалоговое окно* **Операции над блоками**

Эта операция служит для реорганизации состава блока — «перенос» в данном случае означает, что элемент, входивший в состав *Исходного* блока, после выполнения операции будет входить в состав *Результирующего* блока.

После ее активации появляется диалоговое окно **Операции над блоками**, которое включает два маркера для назначения вида переносимых объектов и списки для выбора исходного (откуда взять объекты) и результирующего (куда их поместить) блоков (рис. 9.3-8).

При переносе в результирующий блок выбранных (отмеченных) элементов порядок выполнения операций будет следующим:

- активировать маркер соответствующей опции в окне **Операции над блоками**;
- в списке **Выбор результирующего блока** отметить блок, в который переносятся элементы;
- нажать кнопку **ОК** (окно закрывается);
- выбрать (отметить) на модели переносимые элементы;
- нажать кнопку **ОК** в разделе **Схема**.

Если выбрана опция переноса всех элементов из одного блока в другой, то в левом списке следует отметить исходный блок, в правом — результирующий, и нажать кнопку **ОК**. Диалоговое окно закроется — и элементы будут перенесены.

## Управление блоками



Операция аналогична управлению группами элементов; используется для управления атрибутами блоков и позволяет выполнить следующие действия: переименование блоков, сортировка блоков по заданному признаку, удаление блоков и изменение места выбранного блока в списке блоков.

## 9.4. Создание стандартных конструкций



Для стандартных конструкций (подконструкций) достаточно часто используемых в практике проектирования предусмотрена возможность генерации соответствующих расчетных моделей. Для этого в диалоговом окне (см. рис. 9.4-1) следует из выпадающего списка выбрать тип конструкции, задать геометрические параметры и жесткостные характеристики.

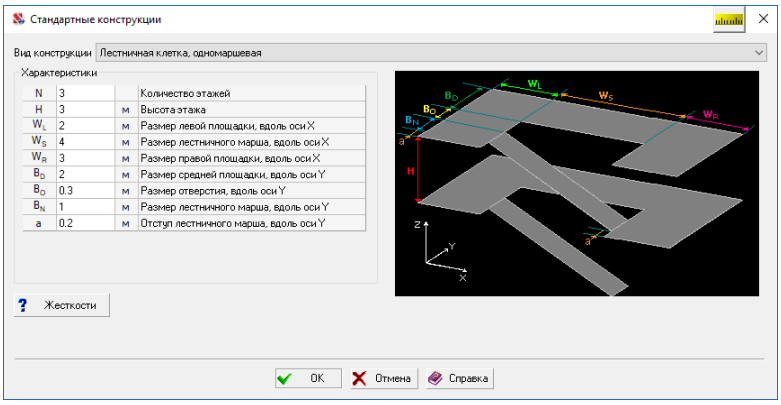
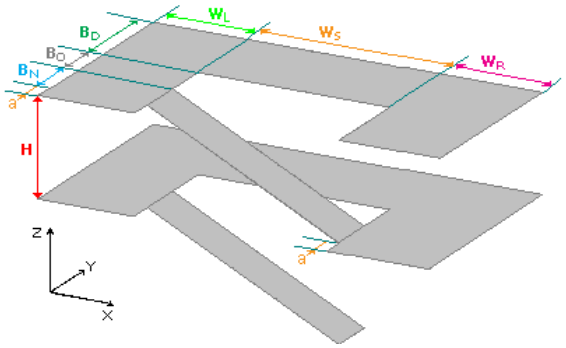
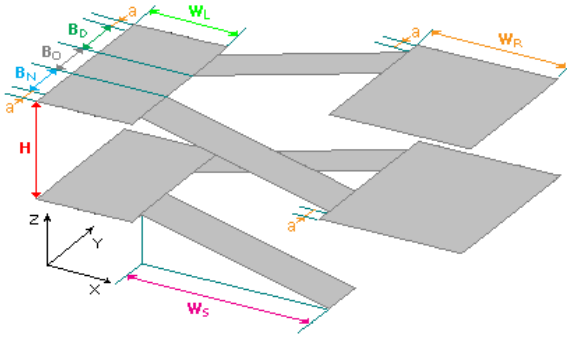



Рис. 9.4-1. *Диалоговое окно* **Стандартные конструкции**

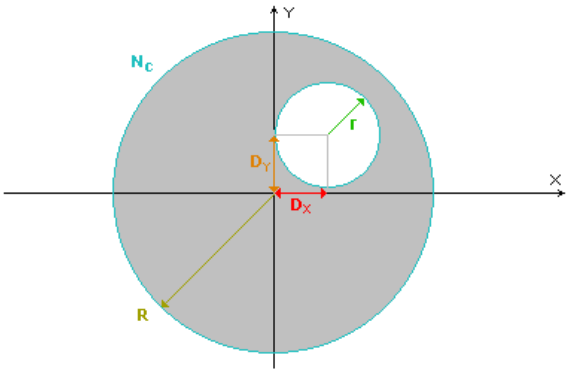
В программе реализованы следующие типы конструкций



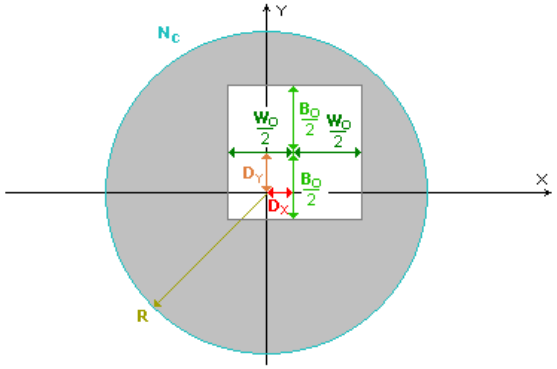

*Лестничная клетка, одномаршевая*



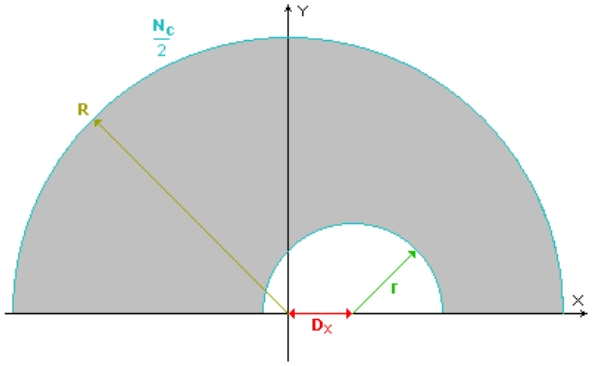

*Лестничная клетка, двухмаршевая*



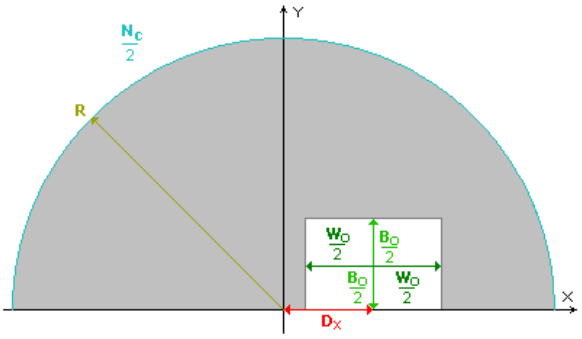

*Круглая плита с круглым отверстием*



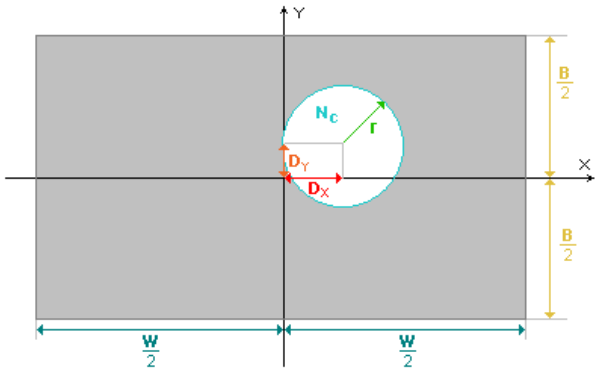

*Круглая плита с прямоугольным отверстием*



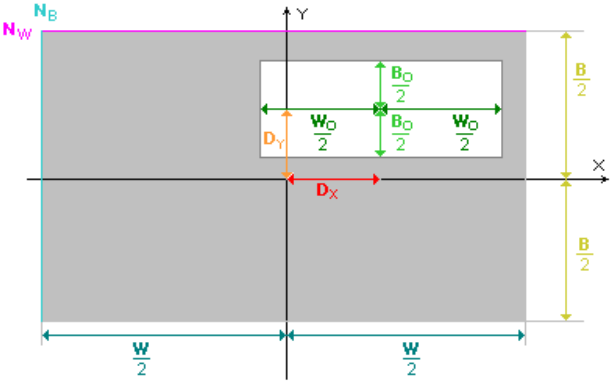

*Полукруглая плита с полукруглым вырезом*



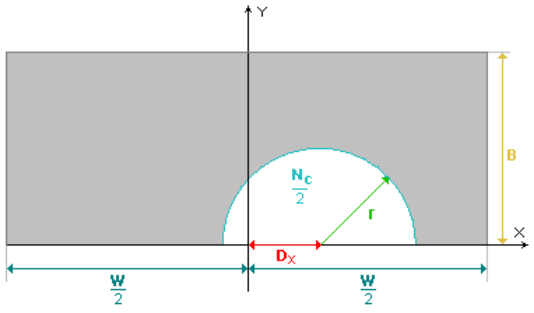

*Полукруглая плита с прямоугольным вырезом*



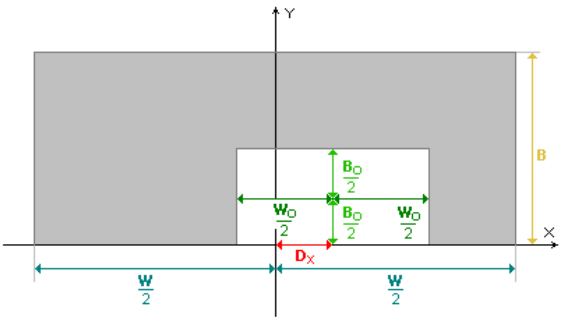

*Прямоугольная плита с круглым отверстием*



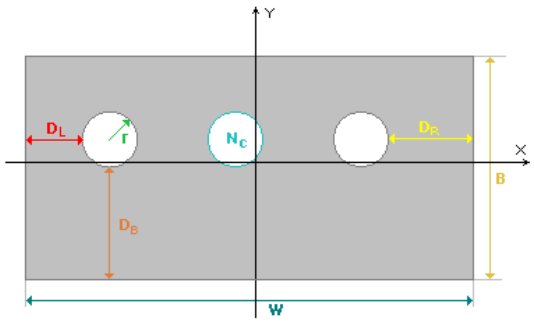

*Прямоугольная плита с прямоугольным отверстием*



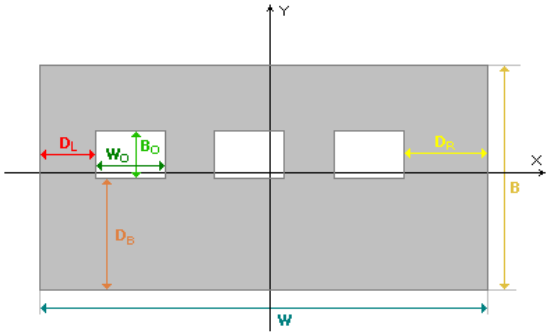

*Прямоугольная плита с полукруглым вырезом*



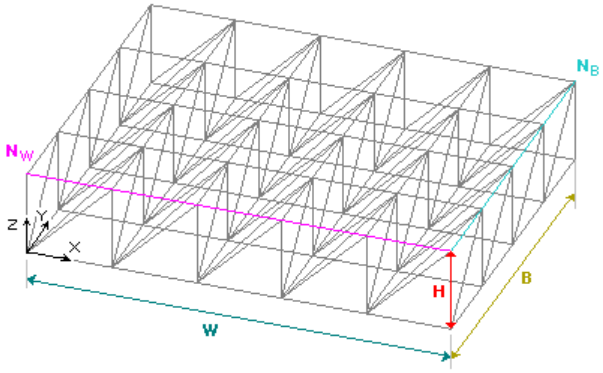

*Прямоугольная плита с прямоугольным вырезом*



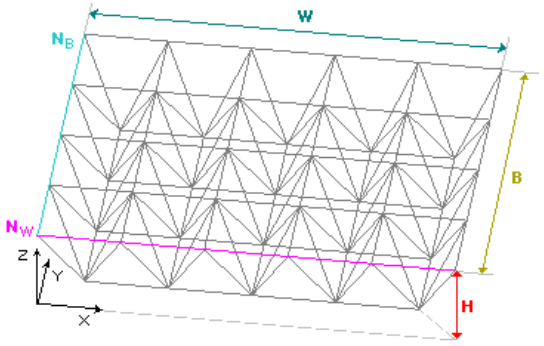

*Прямоугольная плита с несколькими круглыми отверстиями*



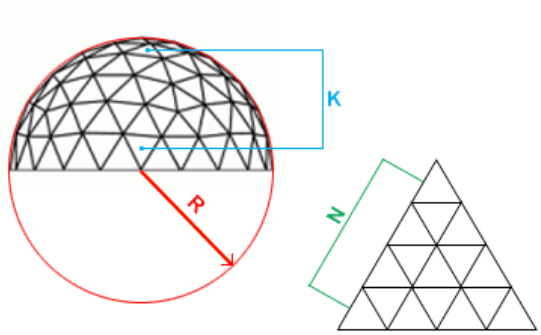

*Прямоугольная плита с несколькими прямоугольными отверстиями*



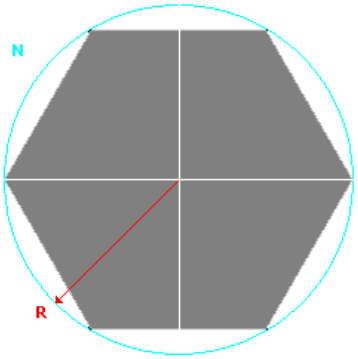

*Ферма-крыша*




*Ферма-крыша, сдвинутая на полшага*




*Геодезический купол*




*Правильный многоугольник*

## 9.5. Операции с узлами

Все операции с узлами моделей типа **ФОРУМ** активируются из инструментальной панели (рис. 9.5-1).

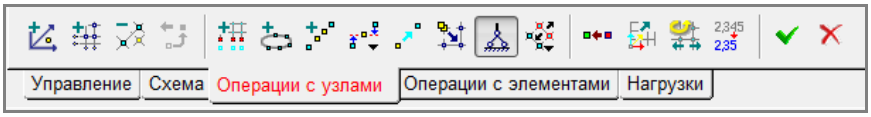



Рис. 9.5-1. *Инструментальная панель* **Операции с узлами**

Эти операции идентичны соответствующим операциям с конечноэлеметными моделями, которые описаны в разделе 6.2.

## 9.6. Операции с элементами

Ниже описаны функции раздела **Операции с элементами** инструментальной панели. Большинство операций идентично соответствующим операциям с конечно-элементными моделями (см. раздел

6.3), поэтому здесь приведено описание только тех операций, которые специфичны для укрупненных моделей.

## Изменение жесткостных характеристик



Эти операции позволяют изменить жесткостные характеристики выбранных стержневых или пластинчатых элементов. Они идентичны соответствующим операциям для конечно-элементных моделей (см. раздел 7.1). Единственная разница состоит в том, что вместо термина имя типа жесткости здесь используется понятие *марка*.

## Сведение стен и перекрытий



Как правило, проблема нестыковки между собой стен или перекрытий возникает после импорта модели из архитектурных систем. Рассматриваемая операция используется для устранения неточности модели путем «стягивания» таких объектов. При ее активации появляется диалоговое окно (рис. 9.6-1), на первой странице которого можно выбрать набор действий по корректировке модели, отметив соответствующие маркеры.

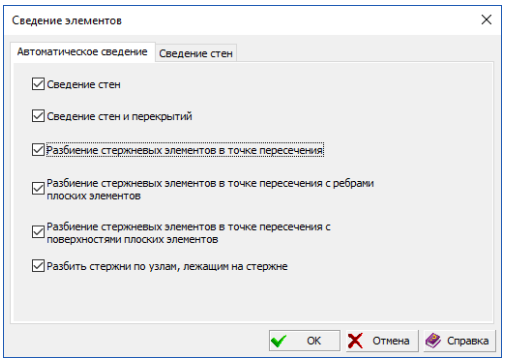



Рис. 9.6-1. *Страница* **Автоматическое сведение**

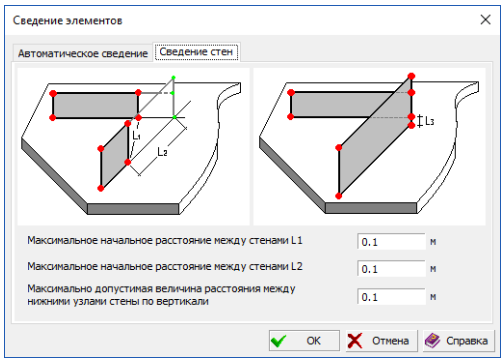



Рис. 9.6-2. *Страница* **Сведение стен**

Здесь предусмотрен следующий набор действий:

- сведение стен;
- сведение стен и перекрытий;
- разбиение стержневых элементов в точке пересечения с ребрами плоских элементов;
- разбиение стержневых элементов в точке пересечения с поверхностями плоских элементов;
- производить сведение для выбранных элементов;
- разбить стержни по узлам, лежащим на стержне.

При активном маркере **Сведение стен** диалоговое окно будет иметь две страницы. На второй странице (рис. 9.6-2) следует задать максимальные расстояния (между стенами и между нижними узлами по вертикали), при которых программа должна рассматривать две стены такими, которые требуют сведения.

Очередность действий при выполнении операции следующая: активация операции, задание параметров, выбор элементов, подтверждение (нажатие кнопки **ОК**).

Нажатие стрелки дополнительных возможностей приводит к появлению меню (рис. 9.6-3), в котором можно выбрать только одну из перечисленных выше операций. Кроме того, в меню есть пункт **Сведение перекрытий по вертикали**, который приводит к появлению диалогового окна (рис. 9.6-4). В этом окне выбирается способ сведения перекрытий (выравниванием по верхней или нижней граням).

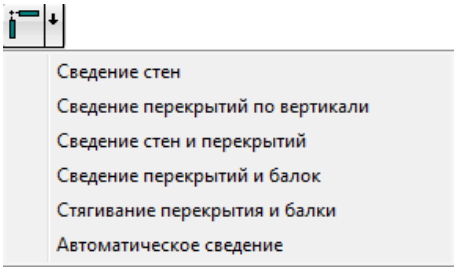



Рис. 9.6-3. *Меню операций*

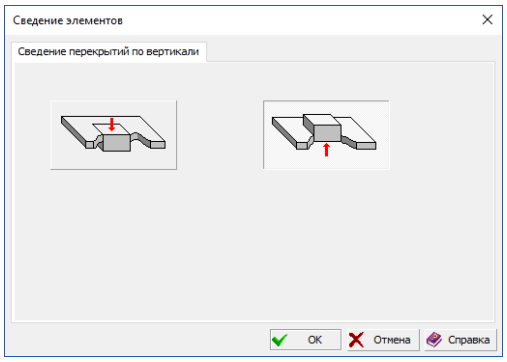



Рис. 9.6-4. *Диалоговое окно* **Сведение элементов**

Следует учитывать, что при стягивании стен и перекрытий, перекрытие не меняет своего положения — операция выполняется путем подтягивания стены.

## Корректировка проемов



Проблема некорректного размещения проемов относительно стены или перекрытия чаще всего возникает при импорте данных из архитектурных систем. Иногда это может быть сделано сознательно в программе **ФОРУМ** для моделирования дверных проемов с помощью «сдвинутого» на контур стены окна (путем переноса узлов). Для устранения такого рода неточностей модели используется рассматриваемая операция. В результате ее выполнения пересекающиеся проемы (рис. 9.6-5, *а*) объединяются в один проем, а контур проема, пересекающего контур элемента, образует новый контур (рис. 9.6-5, *б*). Для выполнения операции следует после ее активации выбрать элементы с некорректным расположением проемов и нажать кнопку **ОК** в инструментальной панели.

*а)* *б)*

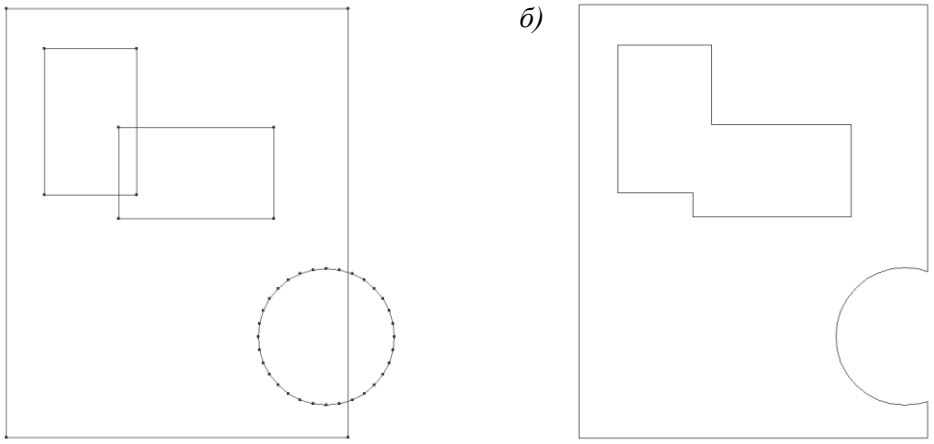


Рис. 9.6-5. *Проемы до (а) и после (б) выполнения операции корректировки*

## Удаление проемов



Операция предназначена для удаления проемов в элементах стен, перекрытий и крыш.

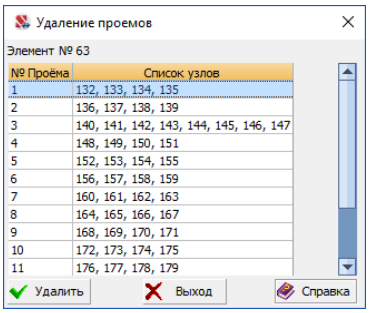



Рис. 9.6-6. *Диалоговое окно* **Удаление проемов**

Для ее выполнения следует выполнить следующие действия:

- активировать операцию, после чего появится диалоговое окно **Удаление проемов** (рис. 9.6-6);
- выбрать на схеме или в дереве проекта элемент, в котором удаляются проем или проемы;
- в диалоговом окне **Удаление проемов** отображается список проемов выбранного элемента с указанием номеров узлов каждого проема;
- выбрать в списке удаляемый проем (проем будет отмечен на схеме) и нажать на кнопку **Удалить** в диалоговом окне;
- повторить предыдущее действие для других удаляемых проемов этого элемента;
- после завершения операции, не закрывая диалогового окна, выбрать на схеме или в дереве проекта следующий элемент, в котором удаляются проемы, и повторить приведенные выше действия;
- после завершения работы по удалению проемов выйти из диалогового окна.

Если при выборе элемента в мишень курсора попадает несколько объектов, то выбор нужного выполняется в диалоговом окне **Элементы в мишени курсора**.

Если до активации данной операции один или несколько элементов были селектированы, то элемент с минимальным номером автоматически станет выбранным.

## Продлить стержень до пластины



С помощью этой операции выполняется «подтягивание» стержня (колонны или балки) к выбранному плоскостному объекту (перекрытию или стене). Для выполнения операции следует после ее активации выбрать участвующие в ней объекты и нажать кнопку **ОК** в инструментальной панели.

## Расширение плиты отступом от граней



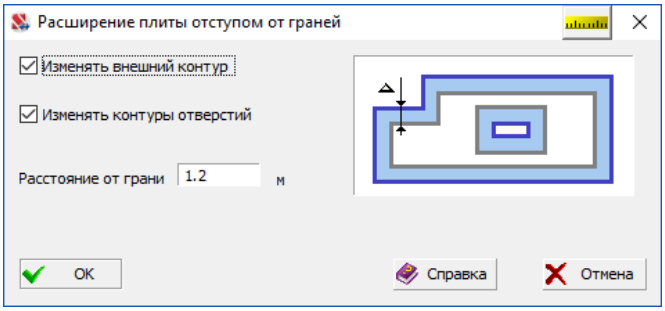



Рис. 9.6-7. *Диалоговое окно* **Расширение плиты отступом от граней**

Операция используется для изменения габаритов плиты путем построения эквидистанты, т. е. линии, равноотстоящей от всех граней плиты на заданное расстояние. Информация, необходимая для выполнения операции, задается в одноименном диалоговом окне (рис. 9.6-7) и включает величину отступа (расстояние до граней). Маркеры **Изменять внешний контур** и **Изменять контуры отверстий** определяют правила выполнения операции и позволяют построить эквидистанту только для одного из видов контуров или задать разные величины отступа для наружного контура и отверстий.

Если контур невыпуклый и величина отступа такова, что грани после изменения габаритов пересекаются, то построение огибающей выполняется без учета таких участков (т. е. контур на таком участке станет выпуклым).

## Разбиение перекрытий и стен балками и колоннами, лежащими в их плоскости



Эта операция используется в тех случаях, когда плиты перекрытия и/или стены необходимо разделить на несколько частей, используя в качестве линии разделения прямые, проходящие через балки и колонны, лежащие в их плоскости.

Наиболее характерным примером использования операции является подготовка к передаче информации о геометрии модели из препроцессора **ФОРУМ** в программу **МОНОЛИТ**.

В программе **МОНОЛИТ** перекрытие компонуется на ортогональной сетке узлов, которые располагаются в местах пересечения конструктивных элементов — балок, стен и колонн. Опорами перекрытию служат опорные стены и колонны. Нагрузка на колонны и стены передается через систему второстепенных и основных балок, а также непосредственно на стены, в случае опирания на них плиты.

Рассматриваемая операция используется в тех случаях, когда модель, сформированную в программе **ФОРУМ**, необходимо модифицировать с учетом правил, предусмотренных в программе **МОНОЛИТ**, т.е. разделить указанный участок перекрытия по линиям балок.

Для выполнения рассматриваемой операции необходимо выполнить следующие действия:

- активировать операцию нажатием кнопки  в инструментальной панели **Операции с элементами**;
- выбрать на схеме только те элементы (балки, колонны, перекрытия и стены), которые являются объектами операции;
- нажать кнопку **ОК** в инструментальной панели.

## Дробление пластин по линии пересечения



В процессе автоматической генерации сетки конечных элементов при переходе из препроцессора **ФОРУМ** в препроцессор **SCAD** учитывается взаимное пересечение плоскостных объектов. При этом сетка порождается «по обе стороны» линии пересечения (рис. 9.6-8).

В тех случаях, когда часть элемента, лежащая по одну сторону линии пересечения, не должна попасть в расчетную модель, можно воспользоваться операцией **Дробление пластин по линии пересечения**, в результате которой каждый плоскостной элемент разбивается на несколько частей по линиям пересечения с другими плоскостными элементами. В этом случае удаление «лишних» элементов можно выполнить в препроцессоре **ФОРУМ**.

Для выполнения операции следует после ее активации выбрать на модели пересекающиеся объекты и нажать кнопку **ОК** в инструментальной панели.

Перед выполнением генерации конечно-элементной сетки выполняется проверка плоскостных объектов. В тех случаях, когда в модели оказываются неплоские элементы, выдается сообщение. Если режим генерации продолжить (проигнорировать сообщение), то не исключены ситуации, когда сетка конечных элементов в зоне пересечения неплоских элементов будет построена некорректно.

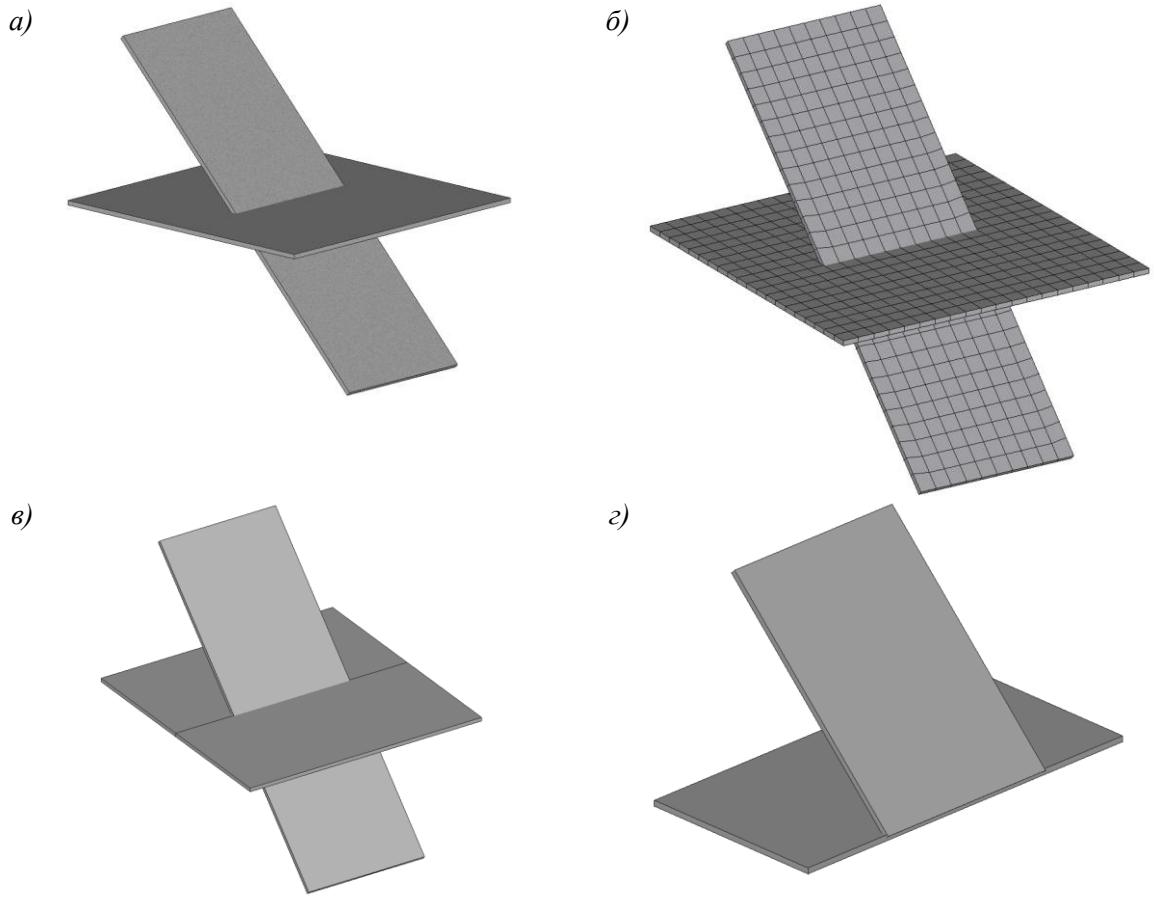



Рис. 9.6-8. *а) Пересечение двух плоскостных объектов в программе* **ФОРУМ**
*б) результат автоматической генерации сетки в препроцессоре* **SCAD**
*в) те же объекты после выполнения операции* **Дробление пластин по линии пересечения**
*г) после удаления «лишних» объектов*

## Операции с парой плоскостных объектов



Если два плоскостных объекта, лежащих в одной плоскости, имеют непустое пересечение, то данная операция позволяет произвести их объединение, пересечение, ... Тип операции выбирается в диалоговом окне (рис. 9.6-9), которое появляется после нажатия кнопки  .

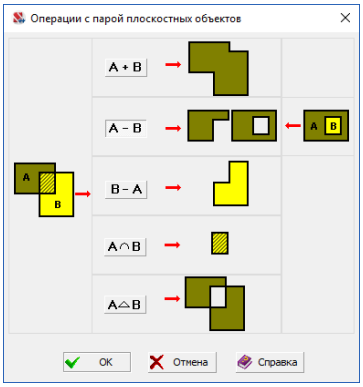



Рис. 9.6-9. *Диалоговое окно* **Операции с парой плоскостных объектов**

В этом окне следует выбрать нужную операцию, отметить на схеме два плоскостных объекта, лежащих в одной плоскости, и нажать кнопку **OK** инструментальной панели. На рисунке 9.6-10 показан пример использования операции объединения.

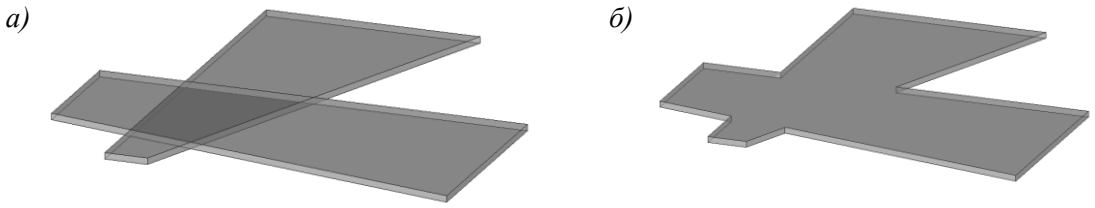



Рис. 9.6-10. *Пересекающиеся плоскостные элементы до а) и после б) выполнения операции объединения*

### Создание поверхностей вращения



Эта операция аналогична той, которая описана в разделе 5.6. Разница состоит только в том, что здесь предусмотрена генерация только пластинчатых схем и, кроме того, пользователь должен указать к какому типу (перекрытие, крыша или стена) следует отнести вновь созданные элементы.

## 9.7. Дерево проекта

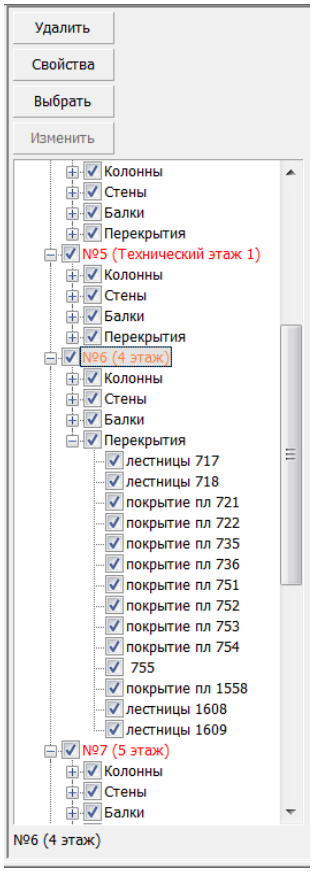



Рис. 9.7-1. *Дерево проекта*

Дерево проекта строится автоматически в процессе формирования модели. Дерево включает панель с набором кнопок управления, собственно дерево проекта и информационную строку с наименованием активного блока.

Дерево имеет многоуровневую структуру и включает следующие уровни представления модели: модель, блок, группа элементов, элемент. Группы элементов могут быть пяти видов: колонны, стены, балки, перекрытия, крыши. Управление деревом выполняется с помощью двух видов кнопок-маркеров вида ***а*** и ***б***.




Рис. 9.7-2. *Фрагмент дерева проекта*

Маркеры вида ***а*** используются для того, чтобы развернуть ⊟ или свернуть ⊞ уровень дерева, рядом с которым они стоят. На рисунке показана развернутая группа элементов **Перекрытия**. Если маркер вида ***а*** отсутствует, то это означает, что в блоке нет элементов соответствующего типа.

С помощью маркеров вида ***б*** отключается (☐) и включается (☑) отображение объектов на экране. Отключить можно всю модель (например, для того, чтобы затем сделать видимым только один блок), один или несколько блоков, группы элементов и отдельные элементы.

Важным понятием при работе с деревом является *активный блок*. Новые элементы автоматически попадают только в активный блок. Имя активного блока записано в информационной строке под деревом проекта, а в самом дереве оно выделяется серым прямоугольником. Для активации блока следует указать курсором на его имя в дереве. Кроме активного блока могут быть *активными* группа элементов и отдельный элемент (он выделяется на модели цветом).

## Панель управления

Верхнюю часть панели дерева проекта занимают элементы управления (рис. 9.7-3). К ним относятся кнопки **Удалить**, **Свойства**, **Выбрать** и **Изменить**.

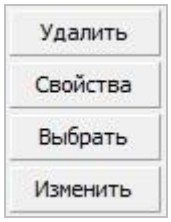



Рис. 9.7-3. *Элементы управления на панели дерева проекта*

С помощью кнопки **Удалить** удаляются активные (отмеченные в дереве) объекты. Это относится как ко всей модели целиком, так и к блокам, группам и отдельным элементам. Кнопка **Свойства** служит для доступа и корректировки параметров активного элемента. При нажатии на кнопку **Выбрать** активный объект отмечается на модели. Кнопка **Изменить** используется для модификации геометрии (например, для задания проемов) таких элементов, как стены, перекрытия и крыши.

## Просмотр и корректировка параметров элементов

Параметры выбранных в дереве объектов можно просмотреть или откорректировать, воспользовавшись кнопкой **Свойства**.

Если активным объектом в дереве является модель (верхний уровень), то после нажатия этой кнопки появляется окно **Общая информация о проекте** (рис. 9.7-4), в котором приведены данные о количественных характеристиках модели. При активном блоке появляется диалоговое окно **Параметры блока** (рис. 9.7-5), в котором указаны его имя и цвет.

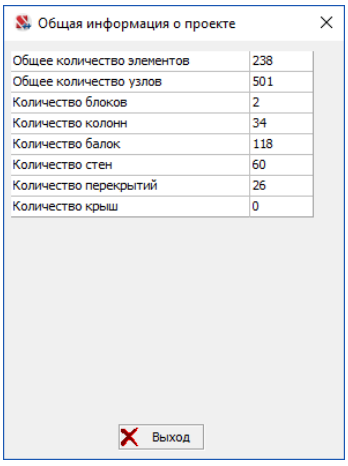



Рис. 9.7-4. *Диалоговое окно* **Общая информация о проекте**

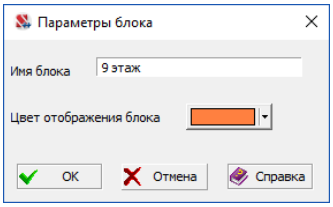



Рис. 9.7-5. *Диалоговое окно* **Параметры блока**

Цвет можно изменить в стандартном окне **Color** (Цвет), которое появляется при указании курсором на цветовое поле. Если в дереве выбран элемент, например, «перекрытие», то появляется диалоговое окно **Характеристики перекрытия/крыши (плиты)** (рис. 9.7-6), в котором в зависимости от вида элемента дана информация о площади сечения и длине или о площади элемента и толщине.

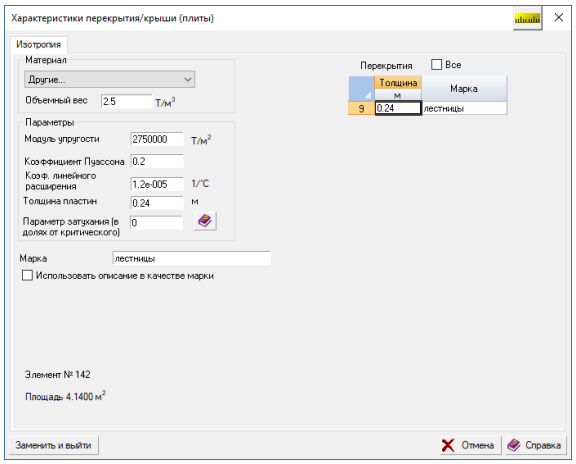



Рис. 9.7-6. *Диалоговое окно* **Характеристики перекрытия/крыши (плиты)**

## Корректировка геометрии элементов

Если активным является двумерный элемент (стена, перекрытие, крыша), то можно воспользоваться кнопкой **Изменить** для корректировки геометрии элементов такого типа. В данном случае под корректировкой понимается изменение границ (контура) элемента, включение оконных и дверных проемов, отверстий и т. п. Для выполнения перечисленных операций вызывается специальная программа, которая представляет собой модификацию программы **Консул**.

Программы **Консул** и **ФОРУМ** оперируют разными объектами, для описания которых используется понятие *контур*. В первой программе — это сечение стержня, а во второй — элемент конструкции.

Контур может быть внешним — и в этом контексте он представляет собой очертание элемента. Внутренний контур — это очертание отверстия или проема. Вершины контура в понятиях модели являются узлами. Окно программы корректировки (рис. 9.7-7) включает меню, инструментальную панель, рабочее поле (с полосами прокрутки при необходимости) и строку состояния.

Все операции в рабочем поле выполняются с помощью курсора. При перемещении курсора по экрану или при выполнении некоторых команд форма курсора меняется. Например, при выборе команды из меню или инструментальной панели он принимает форму стрелки, при обработке команд — форму песочных часов (курсор ожидания). Если курсор попадает на контур элемента, он изображается в виде перекрестья, координаты центра которого и определяют текущее положение курсора.

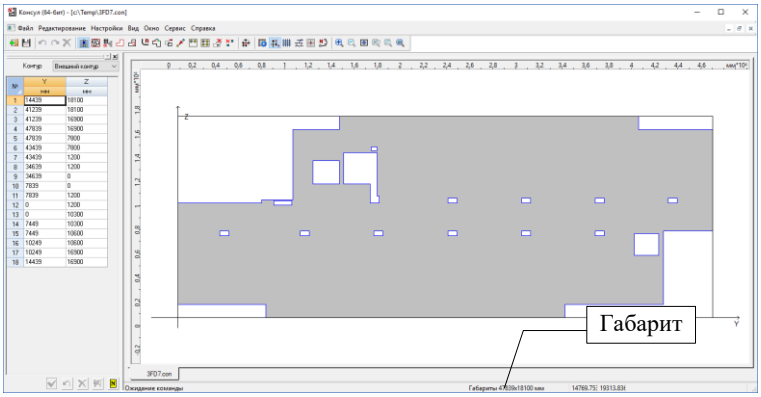



Рис. 9.7-7. *Окно программы корректировки геометрии элементов*

При попадании в узел курсор имеет вид перекрестья с мишенью.

 стандартный курсор — для выбора функции, режима или операции;

 перекрестье с центральной мишенью — для выбора одного узла;

 перекрестье с изображением прямоугольника — для выбора группы узлов или элементов с помощью рамки прямоугольной формы или полигоном;

 курсор используется при переносе узлов, проемов и отверстий, а также при их копировании и дублировании.

Координаты текущего положения курсора выводятся во втором поле строки состояния.

### Габариты элемента



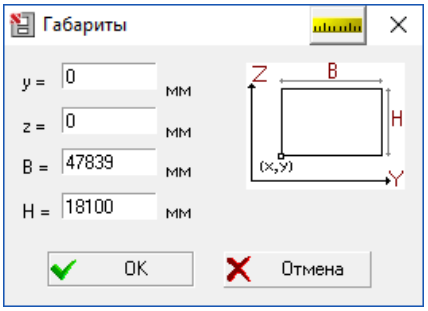



Рис. 9.7-8. *Диалоговое окно* **Габариты**

Эта операция служит для изменения габаритов области рабочего поля, в которой отображается элемент, и используется в тех случаях, когда корректировка связана, например, с увеличением размеров элемента. Размеры задаются в окне **Габариты** (рис. 9.7-8). После выхода из указанного окна в рабочем поле отображается прямоугольник, ограничивающий новые габариты элемента.

### Координатная сетка



Для удобства корректировки элементов можно воспользоваться координатной сеткой. Ввод параметров координатной сетки выполняется в диалоговом окне **Параметры сетки** (рис. 9.7-9), которое появляется после инициализации соответствующей операции. В полях ввода этого окна задаются шаг сетки по горизонтали и по вертикали, а также угол наклона сетки в градусах относительно горизонтальной оси. Вращение сетки производится вокруг начала системы координат. Кроме того, эту операцию можно вызвать из раздела меню ***Параметры*** (пункт **Шаг сетки**).

Следует отметить, что шаг сетки и угол ее наклона могут неоднократно меняться в процессе ввода внутренних контуров (проемов и отверстий) или корректировки внешнего контура.

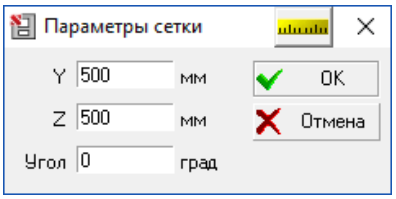



Рис. 9.7-9. *Диалоговое окно* **Параметры сетки**

В программе реализован режим привязки курсора к узлам сетки, что облегчает корректировку геометрии элементов. Инициализация режима привязки выполняется нажатием кнопки  в инструментальной панели. Если этот режим включен, то при вводе и корректировке контуров элементов и отверстий новые узлы будут автоматически привязываться к ближайшему к курсору узлу сетки.

На экране сетка появляется сразу после ввода ее параметров (рис. 9.7-9), но может отключаться и включаться кнопкой  на инструментальной панели.

### Корректировка контура элемента



Нажатие кнопки **Многоугольный внешний контур** в инструментальной панели активирует операцию корректировки внешнего контура элемента.

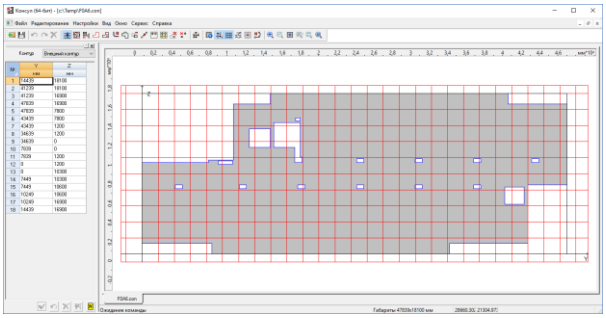


Рис. 9.7-10. *Корректировка внешнего контура*

Для корректировки необходимо подвести курсор к любой точке на контуре, после смены вида курсора (перекрестье для произвольной точки или перекрестье с мишенью для точки перелома) нажать левую кнопку мыши и «перетянуть» выбранную точку в новое положение. Фиксация новой точки перелома выполняется нажатием левой кнопки мыши. Процесс корректировки завершается двойным нажатием левой кнопки мыши. На рис. 9.7-10 показан элемент после корректировки внешнего контура. Следует обратить внимание на дверные проемы, которые представляют собой «углубления» во внешнем контуре, а не отверстия.

**При перемещении вершин не допускается: самопересечение ребер, образующих внешний контур элемента, и выход отверстий за границы внешнего контура.**

### Ввод отверстий и проемов

В программе предусмотрены три вида операций для ввода внутренних контуров:

- ввод контура в виде замкнутого полигона — кнопка  в инструментальной панели;
- ввод контура в виде окружности с динамическим назначением ее размеров (раздел меню ***Редактирование***);
- ввод контура в виде окружности заданного радиуса (раздел меню ***Редактирование***).

Порядок операций при вводе и корректировке контура в виде замкнутого полигона не отличается от аналогичных действий, выполняемых при корректировке внешнего контура.

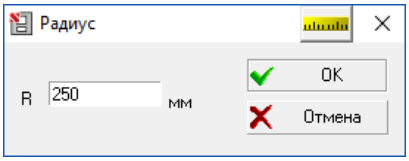



Рис. 9.7-11. *Диалоговое окно* **Радиус**

При выполнении операции ввода контура в виде окружности с динамическим назначением ее размеров необходимо установить курсор в точку, соответствующую центру окружности, и после нажатия левой кнопки мыши перемещать курсор до достижения необходимых размеров окружности. После двойного нажатия левой кнопкой мыши или левой кнопки мыши и клавиши «Пробел» на клавиатуре контур отверстия будет зафиксирован. Если в процессе операции нажать правую кнопку мыши, ввод контура будет прерван.

Если выбрана операция с заданием радиуса окружности, то она выполняется в соответствующем диалоговом окне (рис. 9.7-11). После выхода из окна (кнопка **ОК**) для создания отверстия достаточно указать курсором точку привязки центра окружности и нажать левую кнопку мыши.

Количество точек (узлов) на окружности задается с помощью операции, которая инициализируется нажатием кнопки  в инструментальной панели. Количество точек на дуге будет пропорционально длине дуги.

**При вводе многоугольных внутренних контуров не допускается их пересечение с внешним контуром и взаимопересечение.**

**При выборе количества узловых точек на окружности следует помнить, что задание слишком большого числа точек на дуге может привести к возникновению вырожденных конечных элементов и, как следствие, потере точности решения.**

### Параметрические отверстия

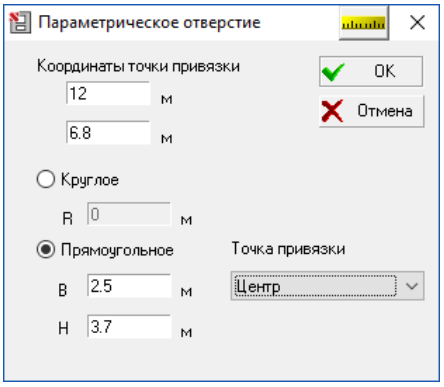



Рис. 9.7-12. *Диалоговое окно* **Параметрическое отверстие**

Эта операция вызывается из раздела меню ***Редактировать*** (рис. 9.7-12) и позволяет создать прямоугольное или круглое отверстие заданных размеров и с заданной точкой привязки. Данные для выполнения операции назначаются в диалоговом окне **Параметрическое отверстие**. Выбор вида отверстия (*Круглое* или *Прямоугольное*) выполняется с помощью маркеров. Из списка **Точка привязки** выбирается положение точки, которой прямоугольное отверстие будет привязываться к точке с заданными в окне координатами (**Y**, **Z**). Отверстие появляется после выхода из окна по нажатию кнопки **ОК**.

### Удаление отверстий и проемов



Для удаления отверстия или проема следует вызвать эту операцию, установить курсор в любое место внутри удаляемого внутреннего контура и нажать левую кнопку мыши.

### Сглаживание углов



Сглаживание углов выполняется путем вписывания в угол дуги окружности заданного радиуса. После активации операции следует указать курсором на точку перелома контура (внешнего или внутреннего), и после смены типа курсора на перекрестье с мишенью нажать левую кнопку мыши. В появившемся диалоговом окне **Радиус** (рис. 9.7-13) задать радиус и нажать кнопку **ОК**.

На рис. 9.7-14 показан элемент со сглаженными углами. Количество точек (узлов) на полной окружности задается с помощью операции **Количество точек на окружности**, которая инициализируется нажатием кнопки  в инструментальной панели. Количество точек на дуге будет пропорционально длине дуги.

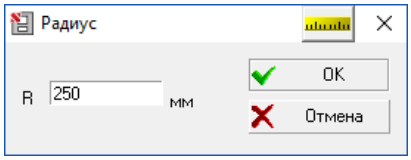



Рис. 9.7-13. *Диалоговое окно* **Радиус**

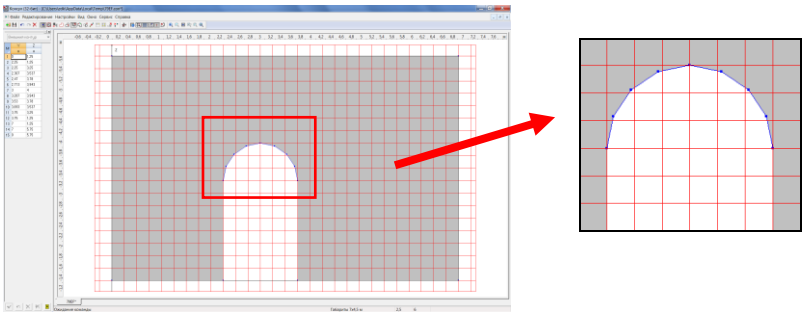


Рис. 9.7-14. *Дверной проем со сглаженными углами*

### Создание дуги на контуре



С помощью этой операции можно построить дугу на внутреннем или внешнем контуре. Построение выполняется по трем точкам, две из которых (начало и конец дуги) должны лежать на контуре. Контур может «выгибаться» как «в тело», так и «из тела» элемента. Первая и последняя точки могут лежать на смежных участках контура. Количество точек перелома дуги (узлов) зависит от числа точек на полной окружности, заданных с помощью операции **Количество точек на окружности** и будет пропорционально длине дуги.

*а*) *б*) *в*)

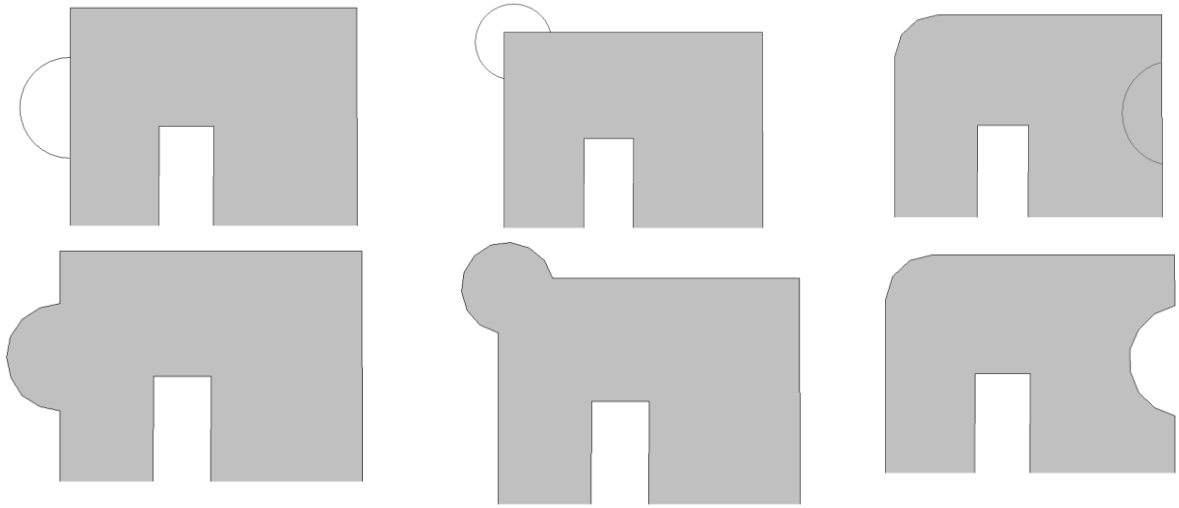


Рис. 9.7-15. *Создание дуги на контуре:*
*а) на прямолинейном участке контура; б) на смежных участках контура; в) «в тело» контура*

Дуга не может выходить за габариты элемента. Если это происходит, то перед построением необходимо изменить габариты, воспользовавшись одноименной операцией, а затем с помощью операции **Переместить вершины** перенести изображение элемента внутри новых габаритов таким образом, чтобы дуга не пересекала границы габарита. Для построения дуги следует выполнить следующие действия:

- установить курсор в точку начала дуги и нажать левую кнопку мыши;
- перенести курсор в точку конца дуги и нажать левую кнопку мыши;
- переместить курсор в третью точку (на экране будет показана дуга) и нажать левую кнопку мыши.

На рис. 9.7-15 показаны примеры использования операции **Создание дуги**. Для каждого случая построения показана исходная дуга и результат выполнения операции.

В случае *в*) показаны результаты изменения контура в «тело» элемента, в случае б) — на смежных участках, в случае а) — на прямолинейном участке контура. Обратите внимание, что в случае в) не понадобилось изменять габариты элемента.

### Перенос узлов



С помощью этой операции выполняется перемещение группы узлов, выбранных с помощью рамки прямоугольной или полигональной формы. Для перемещения узлов следует:

- активировать операцию;
- выбрать в выпадающем меню вид рамки;
- захватить рамкой перемещаемые узлы;
- переместить курсор внутрь рамки и после смены вида курсора сдвинуть рамку вместе с захваченными ею узлами в новое положение.

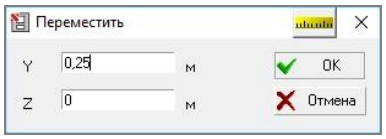



Рис. 9.7-16. *Диалоговое окно* **Переместить**

Новое положение узлов фиксируется нажатием левой кнопки мыши.

Если узлы необходимо сместить на заданное расстояние, то после переноса курсора внутрь рамки следует нажать правую кнопку мыши и задать величину смещения в открывшемся диалоговом окне **Переместить** (рис. 9.7-16).



**При перемещении узлов не допускается: самопересечение ребер, образующих внешний контур элемента, и выход полигональных отверстий за границы внешнего контура.**

### *Копирование отверстий и проемов*



Эта операция позволяет скопировать один или несколько проемов (отверстий), захваченных прямоугольной рамкой или полигоном. Для выполнения операции следует:

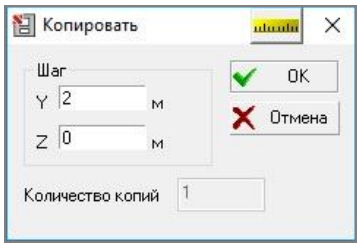



Рис. 9.7-17. *Диалоговое окно* **Копировать**

- активировать операцию;
- выбрать в выпадающем меню вид рамки;
- захватить рамкой копируемые проемы (в поле рамки должны попасть все узлы проемов);
- переместить курсор внутрь рамки и после смены вида курсора, нажав левую кнопку мыши, сдвинуть рамку вместе с захваченными ею проемами в новое положение;
- зафиксировать положение копии нажатием на левую кнопку мыши.

Если копию отверстия надо поместить в определенное место внутри элемента, то после переноса курсора внутрь рамки следует нажать правую кнопку мыши и задать величину ***смещения*** в открывшемся диалоговом окне **Копировать** (рис. 9.7-17). Проемы будут скопированы после выхода из окна по нажатию кнопки **ОК**.



**При перемещении проемов не допускается их пересечение и выход за границы внешнего контура.**

### *Дублирование отверстий и проемов*



С помощью этой операции можно продублировать несколько раз один или несколько захваченных рамкой проемов (отверстий). Для выполнения операции следует:

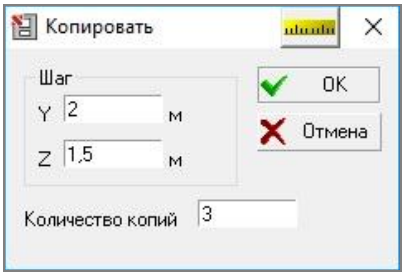



Рис. 9.7-18. *Диалоговое окно* **Копировать**

- активировать операцию;
- выбрать в выпадающем меню вид рамки;
- захватить рамкой дублируемые проемы (в поле рамки должны попасть все узлы проемов);
- переместить курсор внутрь рамки, и после смены вида курсора нажать правую кнопку мыши;
- в появившемся диалоговом окне **Копировать** (рис. 9.7-18) задать значения смещения по осям и количество копий;
- нажать кнопку **ОК** в диалоговом окне, после чего окно закроется, и операция дублирования будет выполнена.

**При копировании проемов не допускается их пересечение и выход за границы внешнего контура.**

### Корректировка координат узлов

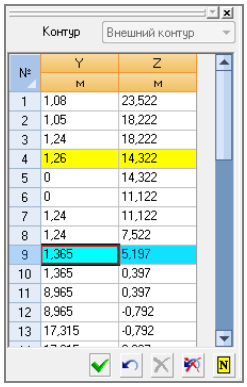



Рис. 9.7-19. *Координаты вершин*

Корректировку положения узлов внешнего и внутренних контуров элемента можно выполнить путем изменения их координат с помощью операции **Корректировка координат вершин** в инструментальной панели или **Вершины** меню ***Редактировать***. После ее активации в левой части экрана появляются (рис. 9.7-19): список контуров в порядке их создания, таблица с координатами вершин, ряд функциональных кнопок. Для корректировки координат узлов следует выполнить следующие действия:

- выбрать из списка контур;
- изменить координаты узлов в таблице координат (в процессе работы узлы отмечаются на контуре цветным кружком);
- или удалить выбранный узел (кнопки **Удалить** и **Отменить удаление**);
- подтвердить полученный результат (кнопка ).

Кнопка отменяет последнее действие по корректировке контура, совершенное до нажатия кнопки подтверждения .

**При перемещении узлов не допускается: пересечение ребер, образующих внешний контур элемента, и выход отверстий и проемов за границы внешнего контура.**

### Удаление узлов

Эта операция используется для удаления узлов как на внешнем, так и на внутренних контурах элемента. Для ее выполнения необходимо:

- активировать операцию;
- выбрать в выпадающем меню вид курсора (для указания на один узел или рамку для удаления нескольких узлов);
- указать на удаляемый узел или захватить рамкой группу удаляемых узлов;
- нажать левую кнопку мыши.

### Отображение сетки

Эта кнопка используется для включения/выключения отображения координатной сетки в пределах габарита элемента.

### Привязка курсора к сетке



Если эта кнопка нажата, то при вводе и корректировке контуров элементов или проемов точки перелома (узлы) будут автоматически притягиваться к ближайшему узлу координатной сетки.

### Узлы на окружности



С помощью этой операции задается количество узлов на полной окружности, которое будет использовано при скруглении углов и вводе круглых отверстий. По умолчанию назначена 21 точка.



**При назначении числа узловых точек на окружности следует помнить, что, увеличивая их число, мы уменьшаем расстояние между ними, и это может в процессе генерации сетки конечных элементов привести к возникновению вырожденных элементов и, как следствие, потере точности решения.**

### Показать узлы



Если эта кнопка нажата, то отображаются узлы на внешнем и внутренних контурах элементов.

## 9.8. Фильтры отображения

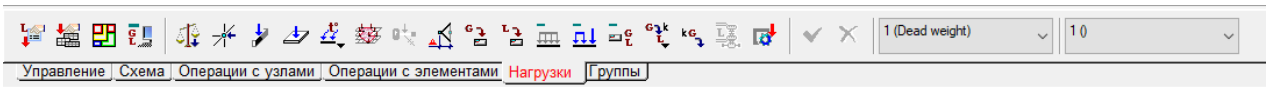
Фильтры (рис. 9.1-1) используются для управления отображением модели и выполняют те же функции, что и в случае конечно-элементной модели.

## 9.9. Назначение нагрузок

Препроцессор **ФОРУМ** позволяет использовать два режима задания нагрузок. Первый режим аналогичен заданию нагрузок для конечноэлементой модели (см. главу 8). Кроме того, в препроцессоре **ФОРУМ** предусмотрена возможность задания временных и постоянных нагрузок (в том числе и нагрузок от собственного веса элементов конструкции). Этот режим описан ниже и в его основу положен принцип привязки нагрузки к перекрытиям (плитам) в зависимости от функционального назначения помещений, которым они принадлежат (за исключением нагрузки от собственного веса, которая определяется автоматически для всех элементов конструкции).

Нагрузки могут задаваться нормативными или расчетными значениями. Кроме того, они могут быть представлены как в виде загружений, так и групп нагрузок, которые формируются в момент генерации конечно-элементной модели.

Инструментальная панель **Нагрузки** содержит следующий набор кнопок управления процессом задания нагрузок:




 — параметры режима задания нагрузок;

 — таблицы нагрузок;

 — назначение типов помещений;

 — удаление нагрузок.

## Параметры режима задания нагрузок



Операция используется для настройки режима формирования схем загружений в процессе генерации конечно-элементной модели. Настройка выполняется в диалоговом окне **Характеристики нагрузок** (рис. 9.9-1).

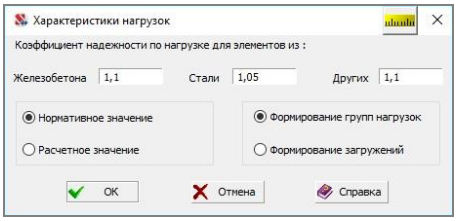



Рис. 9.9-1. *Диалоговое окно* **Характеристики нагрузок**

Окно включает три поля ввода для задания коэффициентов надежности по нагрузке, которые используются при формировании расчетных нагрузок. Кроме того, в окне находятся две группы маркеров, с помощью которых выбираются значения, с которыми нагрузки попадут в конечно-элементную модель (нормативные или расчетные), и форма представления нагрузок — в виде групп нагрузок или загружений.

Если выбран режим формирования групп нагрузок, то каждый вид нагрузки попадет в отдельную группу. Формирование загружений из групп выполняется в препроцессоре **SCAD**.

## Таблицы нагрузок



В автоматическом режиме задания нагрузок (в настоящей версии программы предусмотрен только автоматический режим) управление процессом формирования нагрузок выполняется на основе данных, записанных в таблицы диалогового окна **Описание нагрузок** (рис. 9.9-2, 9.9-3). Окно включает три страницы с таблицами, две из которых содержат описания постоянных и временных нагрузок (приведенных к одному квадратному метру перекрытия), а третья — таблицу с правилами распределения постоянных нагрузок в зависимости от вида помещения (страница **Учет постоянных нагрузок**). Начальное содержание таблиц условно называется «стандартным» и может быть изменено пользователем.

Каждому виду помещений может соответствовать набор постоянных нагрузок (например, собственный вес перекрытия, вес полов и вес перегородок) и только одна временная нагрузка.

## Постоянные нагрузки

Постоянные нагрузки могут включать как нагрузки от собственного веса элементов конструкции, так и другие виды нагрузок.

Список постоянных нагрузок и их значения записаны в таблице на странице **Постоянные нагрузки** диалогового окна **Описание нагрузок** (рис. 9.9-2). Таблица содержит нормативные и расчетные значения нагрузок, а также коэффициент надежности по нагрузке.

Нагрузка от собственного веса автоматически формируется и изменяется при изменении параметров конструктивных элементов схемы. Для автоматического учета собственного веса элементов следует активировать одноименный маркер на рассматриваемой странице.

В программе предусмотрена возможность дополнения или изменения исходного списка нагрузок. Для этого используются кнопки, расположенные в нижней части окна.

Для ввода нового вида нагрузки необходимо выполнить следующие действия:

- нажать кнопку **Добавить**, после чего в таблице появится новая строка;
- в графе **Наименование** ввести наименование нагрузки;
- в графах **Нормативное значение** и **Расчетное значение** ввести нормативное и расчетное значения нагрузки. Значение коэффициента надежности по нагрузке будет назначено автоматически после смены страницы или повторного входа в окно **Описание нагрузок** (в

принципе, в этой таблице достаточно заполнить любые две графы — значение в третьей будет записано автоматически);

– для использования списка постоянных нагрузок, включая вновь введенный вид нагрузки, при работе с другими проектами следует нажать кнопку **Сохранить** и в стандартном диалоговом окне указать имя файла, который может быть загружен в другой проект с помощью кнопки **Загрузить**.

В случае необходимости с помощью кнопки **По умолчанию** можно вернуть состояние таблицы, предусмотренное разработчиками.

Значения нагрузок задаются в единицах силы на единицу площади (например, в т/м$^2$).

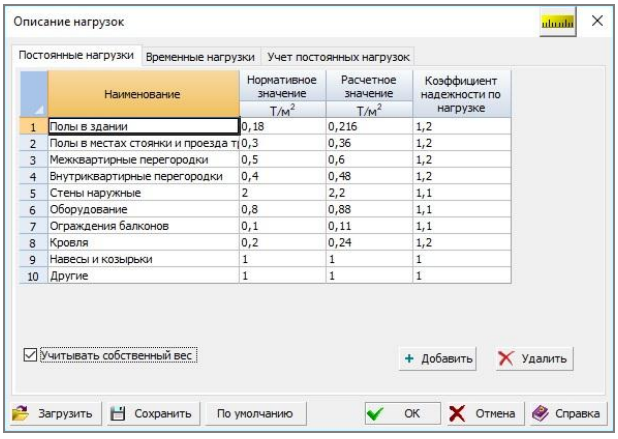



Рис. 9.9-2. *Диалоговое окно* **Описание нагрузок**, *страница* **Постоянные нагрузки**

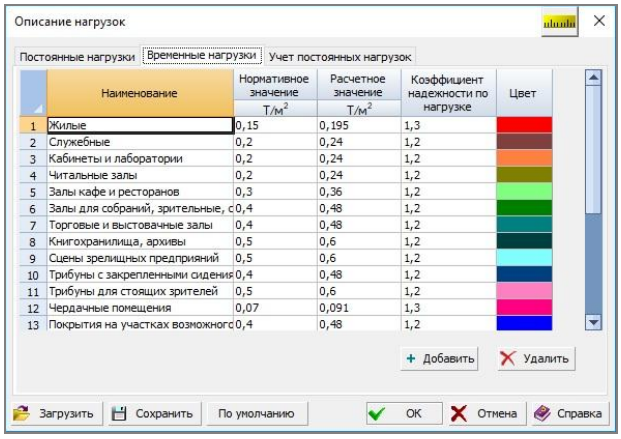



Рис. 9.9-3. *Диалоговое окно* **Описание нагрузок**, *страница* **Временные нагрузки**

## Временные нагрузки

По умолчанию эта таблица в основном соответствует таблице СНиП «Нагрузки и воздействия». Нагрузки, приведенные в таблице, задаются только на перекрытия. Привязка нагрузки к перекрытию выполняется автоматически в зависимости от типа помещения, присвоенного данному перекрытию в окне **Характеристики перекрытия** (рис. 9.9-5). Таким образом, для корректного задания нагрузок необходимо, чтобы перекрытия на функционально разных участках этажа задавались различными элементами перекрытия. Присвоение вида помещения части элемента в программе не предусмотрено.

Правила работы с таблицей **Временные нагрузки** по изменению содержания таблицы аналогичны описанным выше для таблицы **Постоянные нагрузки**.

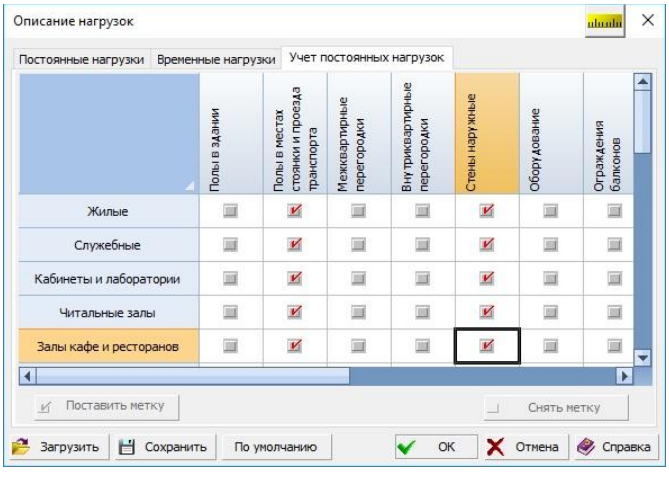



Рис. 9.9-4. *Диалоговое окно* **Описание нагрузок**, *страница* **Учет постоянных нагрузок**

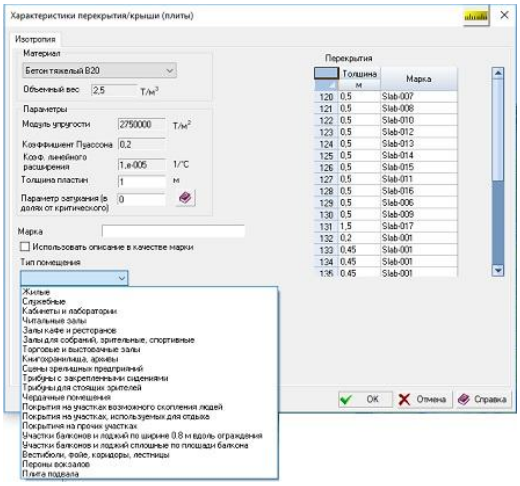



Рис. 9.9-5. *Диалоговое окно* **Характеристики перекрытия/крыши (плиты)**

## Учет постоянных нагрузок

В этой таблице (рис. 9.9-4) записаны правила привязки постоянных нагрузок к перекрытиям в зависимости от типа помещений. В первой графе таблицы указаны типы помещений, повторяющие список в таблице временных нагрузок. Во второй графе показан цвет, которым помещения данного вида будут окрашены на модели при активации фильтра **Типы помещений** —  . В остальных графах, наименования которых совпадают со списком постоянных нагрузок, находятся маркеры, указывающие (в случае активации) на наличие данного вида нагрузки в помещении определенного типа.

Если активировать маркеры в нужных позициях для каждого типа помещения, то в процессе формирования расчетной схемы нагрузки в зависимости от того, формируются загружения или группы нагрузок, будут соответственно складываться или записываться в разные группы, имена которых будут совпадать с наименованием источника нагрузки.

Таким образом, процесс формирования нагрузок сводится к автоматическому определению нагрузок от собственного веса для всех элементов модели, а также назначению каждому перекрытию набора постоянных нагрузок и временной нагрузки в зависимости от типа помещения.

## Особенности учета собственного веса ограждающих конструкций и перегородок

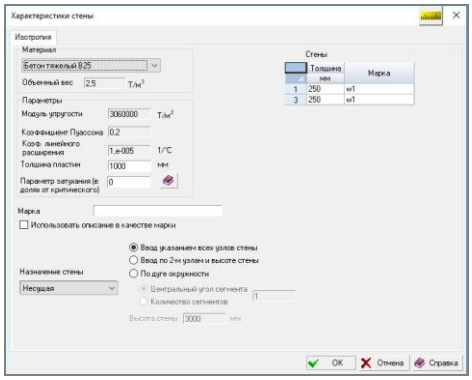


Рис. 9.9-6. *Диалоговое окно* **Характеристики стены**

Если в модели автоматически учитываются нагрузки от собственного веса, то нагрузки от ограждающих конструкций и перегородок различного вида могут быть учтены двумя способами. Во-первых, в виде равномерно распределенной нагрузки (в этом случае активируются соответствующие маркеры таблицы постоянных нагрузок), во-вторых, в виде нагрузки «по линии». Во втором случае перегородки или ограждающие конструкции необходимо ввести в укрупненную модель как стены, а при описании их характеристик в диалоговом окне **Характеристики стены** (рис. 9.9-6) установить признак «Перегородка» в списке **Назначение стены**.



**Если перегородка полностью или частично находится над проемом, то нагрузка от нее не будет передана.**

## Назначение типов помещений



Типы помещений можно назначить как в процессе ввода перекрытий, так и на готовой модели. В последнем случае следует воспользоваться одноименной операцией. После ее активации появляется диалоговое окно (рис. 9.9-7), в выпадающем списке которого перечислены все типы помещений из таблицы *Временные нагрузки* диалогового окна **Описание нагрузки** (рис. 9.9-3).

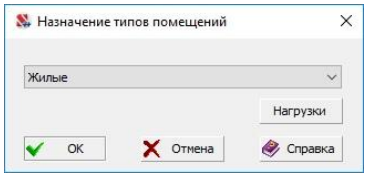



Рис. 9.9-7. *Диалоговое окно* **Назначение типов помещений**

Кнопка **Нагрузки** позволяет увидеть перечень (и параметры) постоянных нагрузок, которые соответствуют выбранному типу помещений в соответствии с таблицей нагрузок.

После выбора в списке нужного типа помещения и выхода из окна по кнопке **ОК** следует отметить на модели перекрытия, которым этот тип присваивается, и нажать кнопку  инструментальной панели.

### Удаление нагрузок



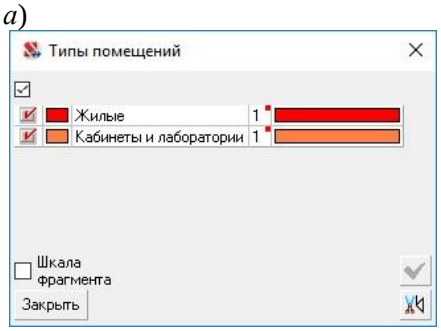
Если активировать данную операцию, отметить на модели перекрытия и нажать кнопку  инструментальной панели, то у выбранных элементов будет «удален» признак типа помещения и при генерации конечно-элементного проекта нагрузки на них назначены не будут.

### Контроль постоянных нагрузок



Фильтр **Типы помещений** позволяет получить цветовую шкалу типов помещений (рис. 9.9-8,а) и, соответственно, постоянных нагрузок на перекрытия. Управление этой цветовой шкалой аналогично управлению другими шкалами, например, жесткостных характеристик элементов. Для получения сводной таблицы нагрузок, назначенных на перекрытие помещения конкретного вида, следует дважды щелкнуть мышью на графу цветовой шкалы с наименованием помещений.

*а*)




*б*)

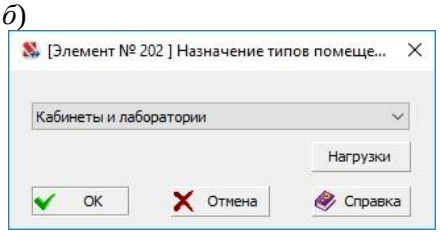



Рис. 9.9-8. *Цветовая шкала* **Типы помещений**

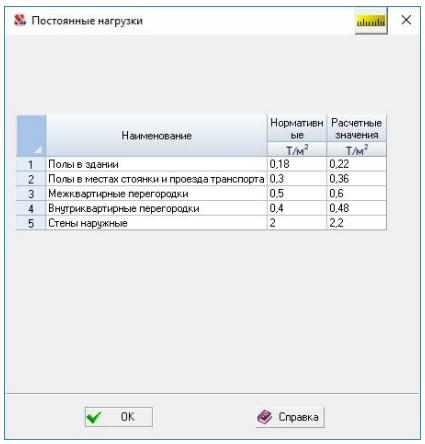



Рис. 9.9-9. *Диалоговое окно* **Постоянные нагрузки**

В результате открывается диалоговое окно [**Элемент №…**] **Назначение типов помещений** (рис. 9.9-8, *б*), которое позволяет сменить тип помещения, а кнопка **Нагрузки** этого окна позволяет вызвать диалог **Постоянные нагрузки** (рис. 9.9-9), в таблице которого перечислены нагрузки, приложенные к перекрытию данного вида, указаны их нормативные и расчетные значения (приведенные к единице площади), а также показана суммарная нагрузка на 1 м$^2$, за исключением собственного веса.

## 9.10. Экспорт модели в SCAD



Кнопка вызова операции генерации проекта во входных форматах комплекса **SCAD** находится в разделе **Схема** инструментальной панели. Режим экспорта данных в **SCAD** предусматривает запись информации как в форматах препроцессора **ФОРУМ** (файлы с расширением **.opr**), так и в форматах проекта **SCAD** (файлы с расширением **.spr**).

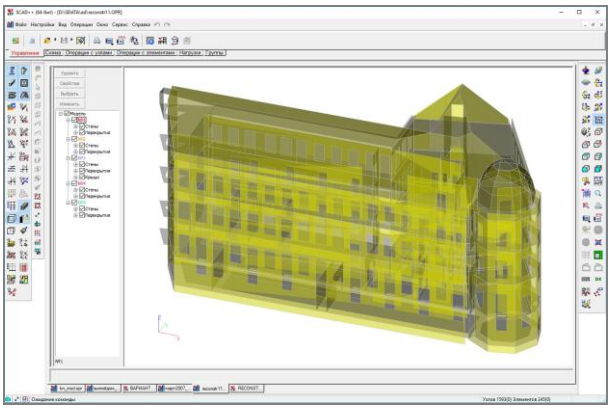


Рис. 9.10-1. *Укрупненная модель в препроцессоре* **ФОРУМ**

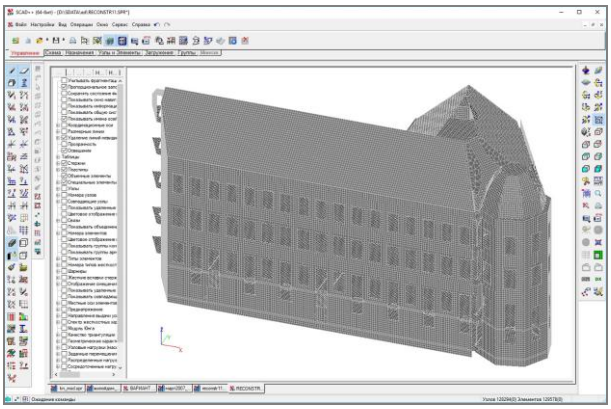


Рис. 9.10-2. *Конечно-элементная модель в комплексе* **SCAD**

В **SCAD** попадают плоскостные объекты вида **Перекрытие**, **Стена**, **Крыша** и стержневые — **Колонна** и **Балка**, которые представляются в комплексе элементами типа 1080, 1060, 1085, 1020 и 1040, соответственно.

Для того чтобы перейти от укрупненной модели к расчетной схеме, необходимо для стержневых объектов выполнить операции замены типа на соответствующие типы стержневых элементов, а для плоскостных — выполнить триангуляцию (в комплексе предусмотрено автоматическое распознавание выбранного плоскостного объекта как контура триангуляции). При этом все параметры объектов (характеристики материала, форма и размеры сечения и т. п.) сохраняются для всех полученных конечных элементов. На рисунках показано представление укрупненной модели в препроцессоре **ФОРУМ** (рис. 9.10-1) и комплексе **SCAD** (рис. 9.10-2).

## Генерация конечно-элементной модели

На основе укрупненной модели может быть выполнено автоматическое построение конечно-элементной модели. В этом случае управление генерацией сетки конечных элементов осуществляется в диалоговом окне **Генерация проекта SCAD** (рис. 9.10-3). Здесь, как и в предыдущем случае, конечные элементы наследуют все параметры объектов (характеристики материала, форму и размеры сечения и т. п.).

Это диалоговое окно появляется после вызова операции **Генерация результирующего проекта** —  в разделе **Схема** инструментальной панели.

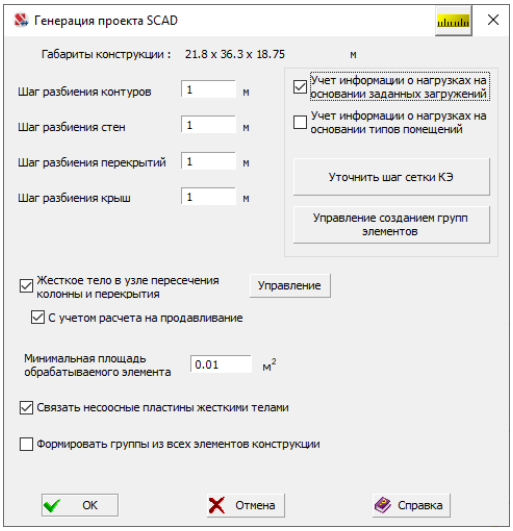



Рис. 9.10-3. *Диалоговое окно* **Генерация проекта SCAD**

Для увязки конечно-элементных сеток различных плоскостных элементов необходимо, в первую очередь, увязать между собой их границы, т. е. контуры элементов. Для этого вводится единый шаг разбивки контуров, который и задается в одноименном поле ввода рассматриваемого окна. Этот шаг постоянен для внешних и внутренних контуров элементов, а также для стержневых элементов, попавших внутрь контура плоскостных элементов.

Независимо от значения шага разбиения контуров, для стен, перекрытий и крыш могут быть заданы собственные значения шага сетки. Это позволяет, например, сделать относительно мелкую сетку на перекрытиях, где предполагается выполнять подбор арматуры, и редкую сетку на стенах, которые будут использованы в модели только для сбора ветровых нагрузок.

В тех случаях, когда не для всех блоков расчетной схемы предполагается детальный расчет и конструирование,

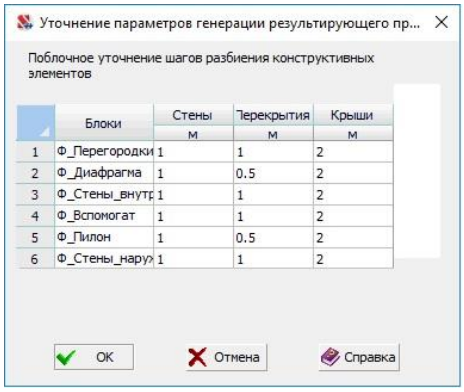



Рис. 9.10-4. *Диалоговое окно* **Уточнение параметров генерации результирующего проекта**

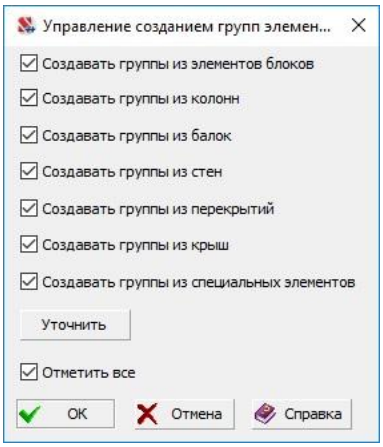



Рис. 9.10-5. *Диалоговое окно* **Управление созданием групп элементов**

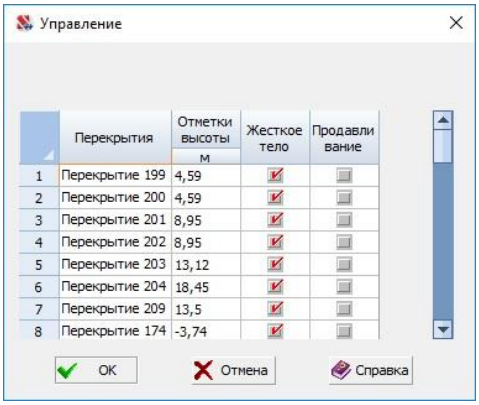



Рис. 9.10-6. *Диалоговое окно* **Управление**

можно изменить параметры сетки по отдельным видам элементов для каждого блока. Это выполняется в диалоговом окне **Уточнение параметров генерации результирующего проекта** (рис. 9.10-4), которое вызывается нажатием на кнопку **Уточнить шаг сетки КЭ**.

В этом окне находится таблица, в строках которой приводятся имена блоков и шаг сетки для разбиения плоскостных элементов в каждом блоке. Поскольку контуры элементов разбиваются с одинаковым шагом, то обеспечивается увязка сетки по всей схеме.

Кроме того, можно использовать операцию  (назначение дополнительных данных для элементов) и для отдельных перекрытий, стен, ... назначить свой индивидуальный шаг триангуляции.

Одновременно с генерацией сетки в расчетной схеме автоматически порождаются группы элементов. По умолчанию в группы объединяются конечные элементы, которые принадлежат одному объекту, а также все элементы, принадлежащие блоку. Правила создания групп можно изменить в диалоговом окне **Управление созданием групп элементов**, которое вызывается нажатием на одноименную кнопку. В окне (рис. 9.10-5) каждому виду группируемых элементов соответствует опция. Кроме того, нажав на кнопку **Уточнить**, можно вызвать дерево проекта, где путем включения и отключения маркеров элементов можно добавлять или исключать их из групп.

По умолчанию программа не создает группы, содержащие только один конечный элемент (например, в случае, когда некая колонна или балка не разбивалась в процессе генерации). Если необходимо создавать и такого типа группы, можно использовать маркер **Формировать группы из всех элементов конструкции**.

Маркер **Связать несоосные пластины жесткими телами** позволяет при генерации конечно-элементной модели получить расчетную модель, в которой при наличии, например, стен различной толщины с несовпадающими срединными поверхностями (стены выровнены по внешней поверхности), появятся элементы типа абсолютно твердых тел, позволяющих учесть возникающие эксцентриситеты.

Если в окне **Генерация проекта SCAD** активна опция **Жесткое тело в узле пересечения колонны и перекрытия**, то в процессе генерации сетки конечных элементов в узлах примыкания колонн к перекрытиям сетка будет формироваться с учетом размеров сечений колонн, а конечные элементы, попадающие в зоны сечения колонн, будут заменены жесткими телами. Если одновременно с этой опцией активировать маркер **С учетом расчета на продавливание**, то в узле примыкания будут генерироваться и жесткие тела, и конечные элементы в зоне сечения колонн (рис. 9.10-9).

Кнопкой **Управление**, стоящей справа от рассматриваемых опций, открывается одноименное диалоговое окно (рис. 9.10-6), в котором с помощью маркеров можно указать перекрытия, для которых выполняется генерация сетки с учетом размеров сечений колонн и расчетов на продавливание. Нажатие правой клавиши мыши в колонках *Жесткое тело* и *Продавливание* вызывает меню, которое позволяет выполнить операции установки или сброса всех отметок, а также инвертирования отметок.

После выхода из окна **Генерация проекта SCAD** по нажатию кнопки **ОК** появляется стандартное окно **Сохранить как …**, в котором задается имя файла результирующей схемы.

Процесс генерации сетки конечных элементов отражается в виде индикатора (рис. 9.10-7) в окне сообщений и может быть прерван нажатием на кнопку **Отмена**.

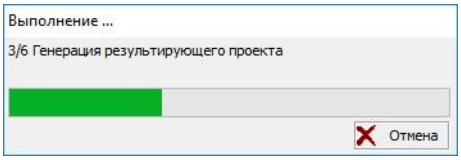



Рис. 9.10-7. *Окно сообщений* **Процесс генерации**

**Всякий раз, когда назначается шаг конечно-элементной сетки, следует помнить, что при очень мелком шаге размерность задачи может превысить возможности компьютера по размещению рабочих файлов и файлов результатов расчета. Рекомендуется назначать мелкий шаг только тем объектам схемы, для которых это необходимо (чаще всего это делается в тех случаях, когда предполагается выполнять подбор арматуры).**

## Моделирование узла пересечения колонны и перекрытия

Если в диалоговом окне **Генерация проекта SCAD** (рис. 9.10-3) включен маркер **Жесткое тело в узле пересечения колонны и перекрытия**, то при генерации конечно-элементной схемы на участках пересечения колонны и перекрытия будет активирован режим формирования сетки, моделирующей область пересечения. Область представляет собой абсолютно твердое тело, размеры которого равны габаритным размерам прямоугольника, соответствующего сечению колонны. В зависимости от положения колонны относительно края плиты область будет иметь различную конфигурацию. Например, на рисунке 9.10-8 показана конфигурация областей опирания прямоугольной колонны на плиту в середине плиты – *а*) и на краю – *б), в), г)* и соответствующие этим конфигурациям жесткие тела.

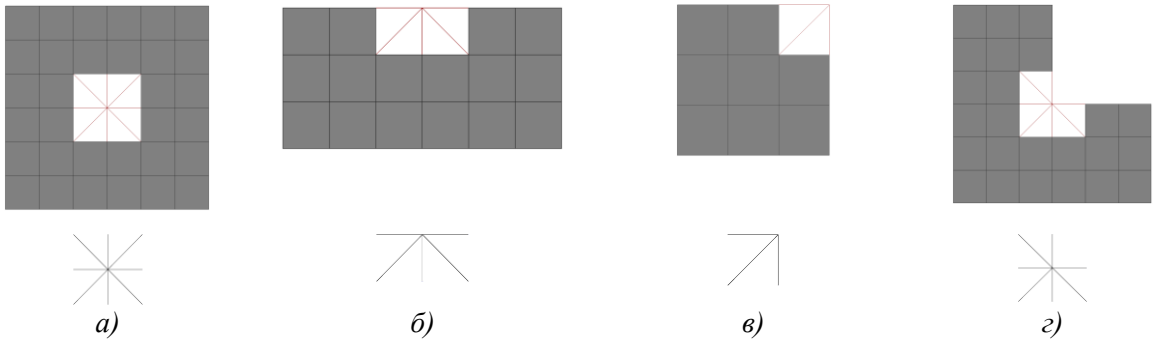



Рис. 9.10-8. *Моделирование области пересечения колонны и перекрытия*

В некоторых случаях программа не может автоматически построить область пересечения (например, при очень маленьком расстоянии между колоннами или между гранью колонны и краем плиты). Результаты автоматической генерации сетки желательно всегда контролировать и при необходимости вносить корректировки в расчетную схему.

Результат генерации зависит также от использования опции **С учетом расчета на продавливание** (рис. 9.10-9):

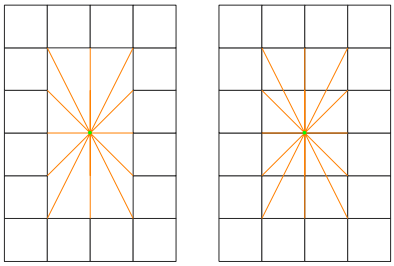


Рис. 9.10-9. *Узлы примыкания (без опции расчета на продавливания и с включенной опцией)*.

## Учет нагрузок

Параметры конечно-элементной модели задаются в диалоговом окне **Генерация проекта SCAD**, которое вызывается при обращении к операции **Генерация результирующего проекта**. Загружения или группы нагрузок будут формироваться только при активности одного из маркеров **Учет информации о нагрузках на основании заданных загружений** или **Учет информации о нагрузках на основании типов помещений.** В первом случае никакая дополнительная информация не требуется. Рассмотрим случай генерации нагрузок на основании типов помещений.

Если в настройках проекта предусмотрено формирование групп нагрузок, то для каждого типа нагрузки будет сформирована отдельная группа, например «Собственный вес», «Полы в здании» и т. п. В случае формирования загружений распределение нагрузок по разным загружениям выполняет пользователь.

Распределение выполняется в диалоговом окне **Формирование загружений** (рис. 9.10-10), которое появляется после нажатия кнопки **ОК** в окне **Генерация проекта SCAD**. Рекомендуется следующий порядок действий в этом окне:

- в поле **Имя загружения** ввести наименование загружения;
- с помощью маркеров выбрать вид нагрузок, входящих в текущее загружение (постоянные или временные), после чего список соответствующих нагрузок будет показан в левой таблице;
- выбрать в таблице нагрузку, которая входит в состав текущего загружения, и перенести ее в правую таблицу (список нагрузок, входящих в текущее загружение), нажав кнопку с изображением одиночной стрелки;
- повторить последнее действие и для других нагрузок, которые помещаются в это загружение (если в загружение помещаются все нагрузки из левой таблицы, то можно воспользоваться кнопкой с двумя стрелками);
- нажать кнопку **Записать как новое** для сохранения загружения под введенным именем.

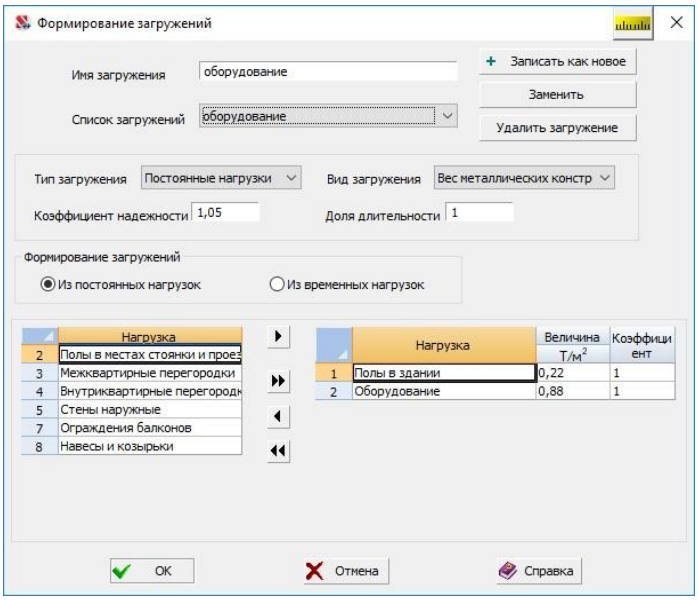



Рис. 9.10-10. *Диалоговое окно* **Формирование загружений**

В правой таблице во второй графе записывается значение нагрузки, а в третьей — коэффициент, с которым данная нагрузка войдет в загружение. При необходимости коэффициент может быть изменен. Следует помнить, что приведенные в таблице значения соответствуют настройкам режима формирования нагрузок, т. е. если в настройках были назначены расчетные значения, то они будут и в таблице (в этом случае умножение на коэффициент надежности по нагрузке уже выполнено). Исключение составляет нагрузка от собственного веса, значение которой в таблице не приводится, т.к. оно зависит от сечения и материала различных элементов.

## Диалоговое окно Результаты генерации

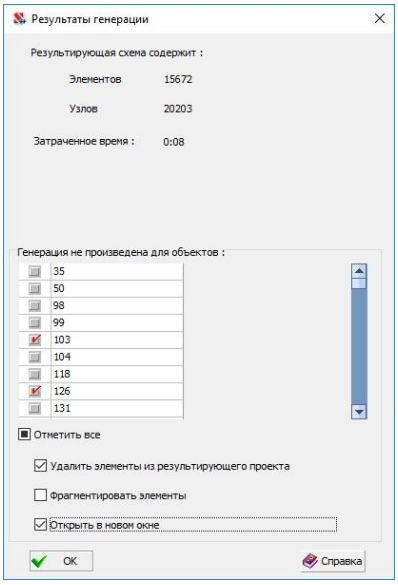



Рис. 9.10-11. *Диалоговое окно* **Результаты генерации**

Окно **Результаты генерации** (рис. 9.10-11) появляется после завершения формирования конечно-элементной расчетной схемы. В нем сообщается о количестве элементов и узлов, полученных в результирующей схеме, а также приводится список плоскостных объектов, для которых не удалось по каким-либо причинам выполнить генерацию сетки. По умолчанию такие объекты попадут в результирующий проект в виде контуров (элементы типа 1080, 1060, 1085). Если активировать опцию **Удалить элементы из результирующего проекта**, то контуры будут удалены. При активной опции **Фрагментировать элементы** — на экране **ФОРУМ**а останутся только эти элементы.

Если перед выходом из этого окна активировать маркер **Открыть в новом окне**, то выполнится автоматическая загрузка сформированной схемы.

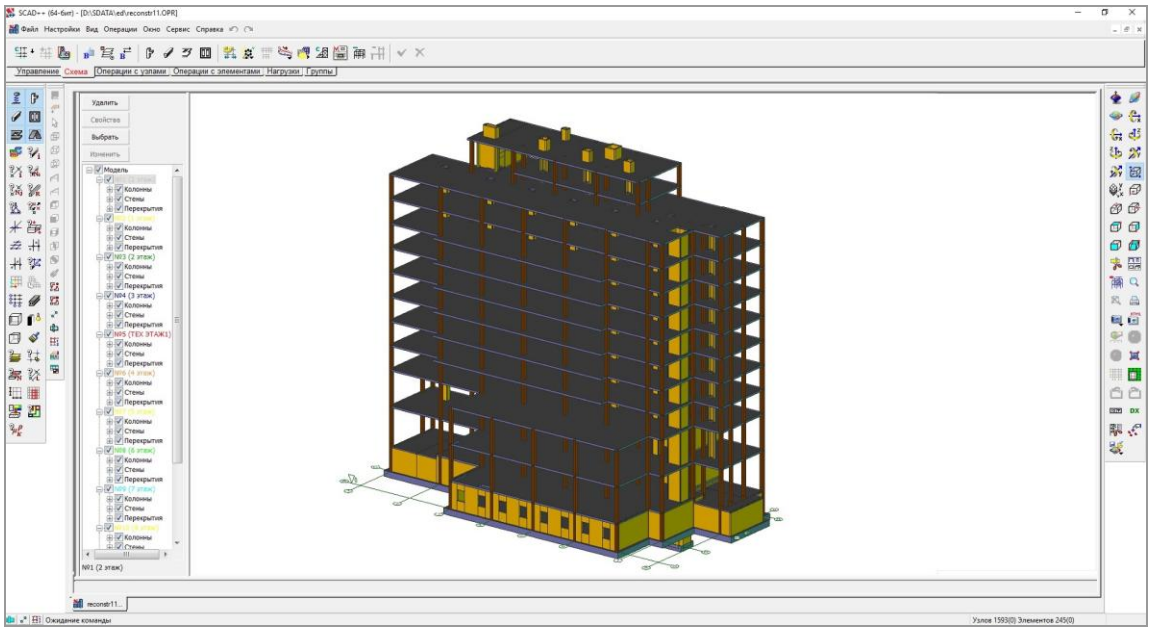


Рис. 9.10-12. *Модель, сформированная в препроцессоре* ***ФОРУМ***

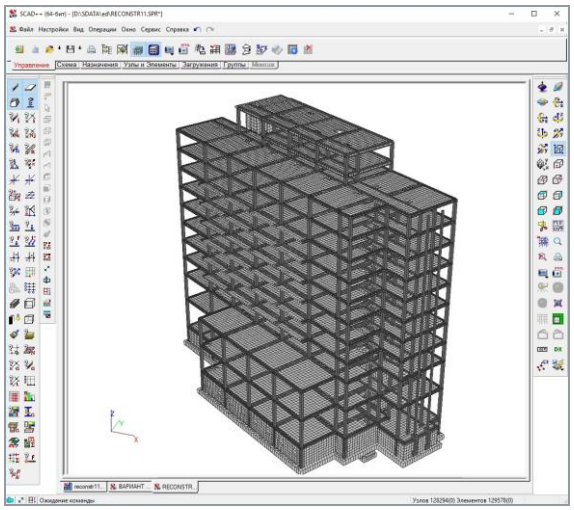


Рис. 9.10-13. *Конечно-элементная модель в комплексе* **SCAD**

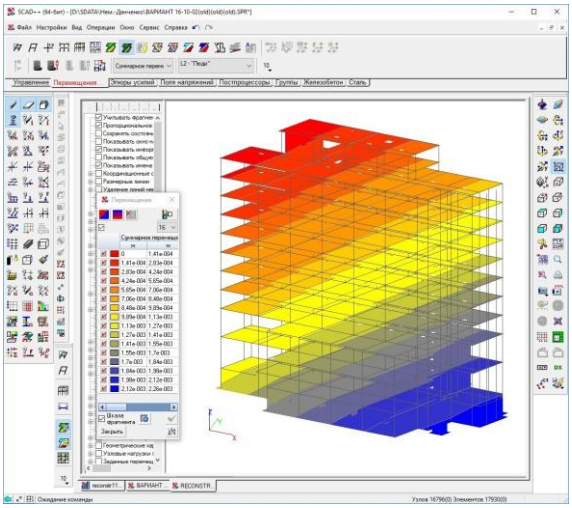


Рис. 9.10-14. *Результаты расчета*

На рис. 9.10-13 приведена сгенерированная конечно-элементная модель задачи, изображенной на рис. 9.10-12. На рис. 9.10-14 приведена эта схема при анализе результатов расчета в комплексе **SCAD**.

При генерации конечно-элементной схемы автоматически не отслеживаются направления местных осей пластинчатых элементов. По умолчанию в результирующей модели направление выдачи усилий в конечных элементах, занимающих вертикальное положение, будет совпадать с направлением оси Z общей системы координат, а в остальных элементах — с направлением оси X. Если, исходя из каких-либо соображений, например, направления раскладки арматурных стержней, предпочтительным является другое направление выдачи усилий, то для его назначения можно воспользоваться соответствующей операцией как в **ФОРУМ**е, так и в конечно-элементном препроцессоре.

## 9.11. Связь с архитектурными и графическими системами

Создание расчетной схемы для прочностного анализа несущих конструкций зданий и сооружений является достаточно сложной задачей. Расчетную модель строят на основе геометрических

размеров и топологии архитектурной части проекта. Широкое внедрение в архитектурное проектирование специализированных программных систем позволило не только автоматизировать процесс проектирования, но и получить цифровую модель объекта проектирования, т. е. его описание в базе данных архитектурной системы. В связи с этим актуальной является задача организации доступа к этой информации и построения на ее основе расчетной схемы.

Естественно, что расчетная схема не является копией архитектурного решения. Однако основные размеры, привязки колонн и несущих стен, очертания перекрытий, положение проемов и отверстий во многом повторяют заданное архитектором. Это позволяет выполнить автоматизированное построение только укрупненной расчетной модели на основе данных архитектурного решения. Автоматическое построение детальной расчетной схемы на основе укрупненной модели возможно (и то не до конца) лишь для очень узкого класса простых объектов. Связано это с тем, что большинство систем прочностного анализа конструкций базируется на методе конечных элементов, и для их расчетных схем, кроме геометрических данных, заимствованных из архитектурного проекта и дополненных построением сетки конечных элементов, следует еще указать условия опирания и примыкания, данные о физико-механических характеристиках материалов, а также сведения о нагрузках. Это требует задания дополнительной информации, необходимой для выполнения прочностного расчета.

Переход от архитектурного решения к расчетной схеме можно представить в виде следующей последовательности операций:

1. Построение на основе внутреннего представления данных архитектурной системы укрупненной конструктивной модели здания, состоящей из таких объектов, как колонны, балки, стены, перекрытия (плиты) и крыши;
2. Удаление из конструктивной модели объектов, которые не включаются в расчетную схему, например, перегородок, элементов ограждения, архитектурных деталей и т. п.;
3. Уточнение, если это необходимо, положения объектов в конструктивной модели и дополнение ее новыми элементами, не учтенными в архитектурном решении;
4. Автоматическое или управляемое пользователем построение сетки конечных элементов с одновременным назначением жесткостных характеристик конечным элементам;
5. Задание условий опирания и примыкания элементов;
6. Ввод нагрузок и специальных исходных данных.

Последние две операции выполняются в комплексе **SCAD**, где, кроме того, могут быть внесены дополнительные изменения в расчетную схему.

Среди архитектурных систем, для которых разработаны программные средства экспорта данных в форматы проекта препроцессора **ФОРУМ**, такие популярные системы как Revit Structure, ArchiCAD®, ALLPLAN®, и ряд других.

## 9.12. Передача данных из препроцессора Форум в программу Монолит



Эта операция предназначена для формирования входных данных программы **Монолит** на основе информации о конструктивных (укрупненных) элементах, заданных в препроцессоре **Форум** (рис. 9.12-1). В общем случае, если параметры конструктивных элементов и их положение в схеме не противоречат правилам, положенным в основу представления объекта проектирования в программе **Монолит**, то после выполнения указанной операции будет сформирован файл с расширением **.opr**, который может быть импортирован в эту программу (рис. 9.12-2).

В составе исходных данных могут быть конструктивные элементы плит, колонн, балок и стен. Все эти элементы должны принадлежать одному этажу (блоку в терминах программы **Форум**).

Если схема, созданная в **Форуме**, состоит из одного блока и элементы, входящие в этот блок, образуют ребристое перекрытие, то файл такого проекта с расширением **.opr** может быть загружен в **Монолит** без использования рассматриваемой операции. При этом все элементы, характеристики которых не соответствуют параметрам **Монолит**а, в результирующий проект импортированы не будут.

В случае, если исходный проект в **Форум**е включает перекрытия, лежащие в разных уровнях, состоит из нескольких блоков или в **Монолит** передается только часть этажа, рекомендуется следующий порядок работы для подготовки схемы к экспорту:

Вариант А.

Фрагментировать исходную схему таким образом, чтобы в окне осталась только экспортируемая часть (если экспортируется целый блок, то в дереве проекта следует деактивировать все остальные блоки);

Активировать операцию **Экспорт в Монолит**;

В появившемся диалоговом окне **Экспорт в Монолит** выбрать опцию **Видимый фрагмент**;

Выйти из окна по кнопке **Ок**;

В стандартном окне **Сохранить как…** задать имя файла с расширением **.opr** с экспортируемой схемой.

Вариант Б.

Выбрать на расчетной схеме все экспортируемые элементы;

Активировать операцию **Экспорт в Монолит**;

В появившемся диалоговом окне **Экспорт в Монолит** выбрать опцию **Отмеченные элементы**;

Выйти из окна по кнопке **Ок**;

В стандартном окне **Сохранить как…** задать имя файла с расширением **.opr** с экспортируемыми элементами.

Вариант В.

Выбрать (отметить) экспортируемые перекрытия;

Активировать операцию **Экспорт в Монолит**;

В появившемся диалоговом окне **Экспорт в Монолит** выбрать опцию **Отмеченные перекрытия и примыкающие элементы**;

Выйти из окна по кнопке **Ок**;

В стандартном окне **Сохранить как…** задать имя файла с расширением .opr с экспортируемыми элементами.

Загрузка проекта с расширением .opr в программу **Монолит** выполняется из раздела **Импорт** меню **Файл**.

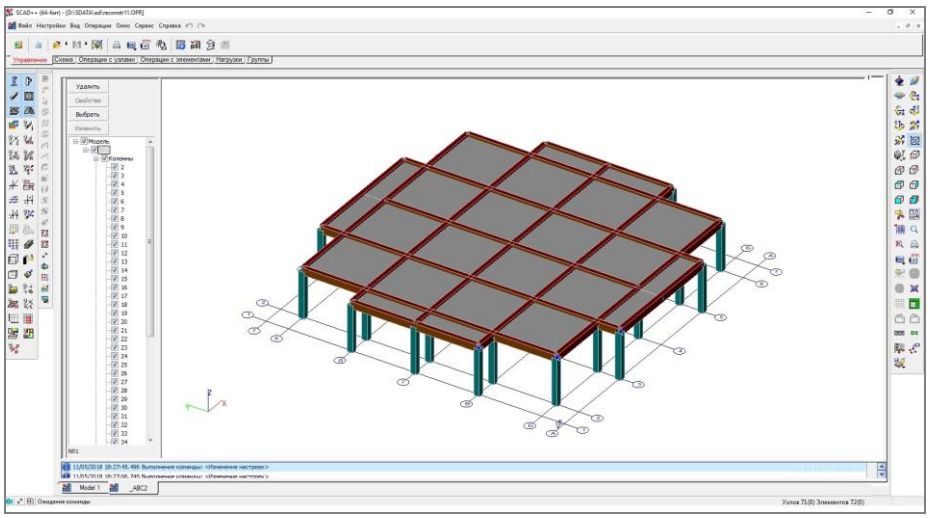


Рис. 9.12-1. Модель в препроцессоре **Форум**

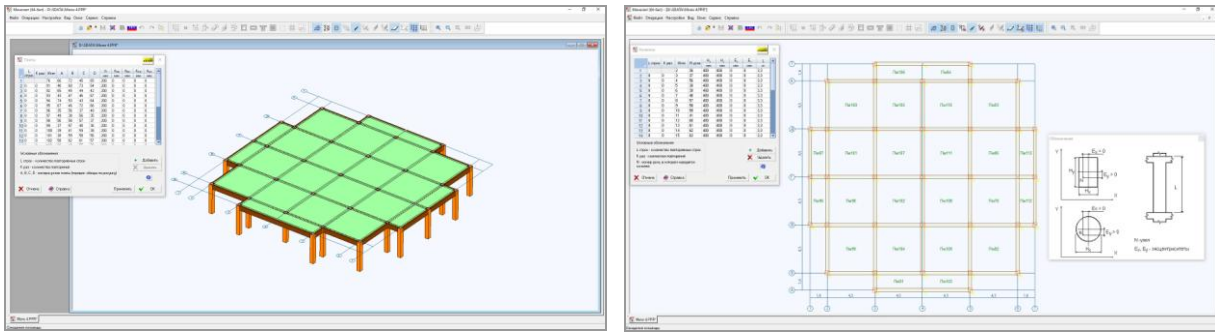


Рис. 9.12-2. Модель, импортированная в программу **Монолит**

## 9.13. Пример создания модели в препроцессоре ФОРУМ

В качестве примера рассмотрим создание простейшей модели (рис. 9.13-1) в препроцессоре **ФОРУМ**. Для этого может быть рекомендован следующий порядок действий:

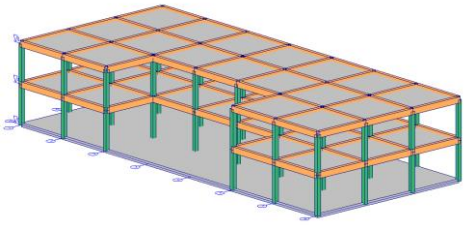


Рис. 9.13-1. *Расчетная модель*

- (*действие* 1) на странице **Управление** инструментальной панели нажать кнопку **Новый проект** —  , ввести в диалоговом окне **Новый проект** идентификационные данные проекта и назначить единицы измерения основных величин (здесь и далее подразумевается, что выход из диалогового окна после ввода данных выполняется нажатием кнопки **ОК**);
- (2) в появившемся диалоговом окне **Сохранить как…** ввести имя файла, в котором будет сохраняться проект;
- (3) на странице **Схема** инструментальной панели нажать кнопку **Задание сетки разбивочных осей** —  и задать в диалоговом окне **Задание сетки разбивки** параметры осей (для отображения осей нажать кнопку фильтров  — **Отображение разбивочных осей**).

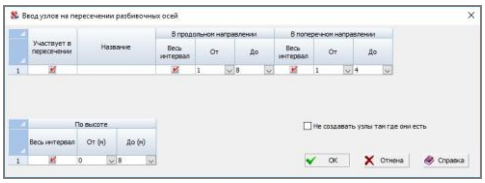


Рис. 9.13-2. *Диалоговое окно* **Ввод узлов на пересечении разбивочных осей**

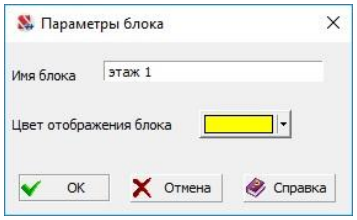



Рис. 9.13-3. *Диалоговое окно* **Параметры блока**

- (4) На странице **Схема** инструментальной панели нажать кнопку **Генерация узлов на сетке** —  и назначить в диалоговом окне (рис. 9.13-2) границы участка, в рамках которого на пересечениях осей будут создаваться узлы. При этом отметки уровней рассматриваются как координаты узлов по оси Z. Отображение узлов на схеме вызывается кнопкой фильтров  — **Узлы**.
- (5) На странице **Схема** инструментальной панели нажать кнопку **Создать блок** —  , и в диалоговом окне **Параметры блока** (рис. 9.13-3) задать имя блока и назначить цвет, которым блок будет отображаться на модели. После выполнения этой операции в дереве проекта появится секция (пока пустая) с элементами нового блока.

Вновь созданный блок автоматически становится активным, т. е. в него будут включаться все элементы,

которые вводятся непосредственно после создания блока.

– (6) На странице **Схема** инструментальной панели нажать кнопку с изображением вводимого элемента (например, колонны) —  и в диалоговом окне **Жесткость стержневых элементов** (рис. 9.13-4) задать имя колонны, назначить вид сечения (параметрическое или стальной прокат) и способ ввода.

Ввод колонны можно выполнить двумя способами.

Если активна опция **Высота колонны**, то ввод выполняется указанием на один узел привязки колонны, а высота колонны определяется значением, записанным в поле ввода (при отрицательном значении — колонна будет направлена от точки привязки вниз). Естественно, что вводимые таким способом колонны всегда вертикальны. Зададим высоту колонны равной 4 м.

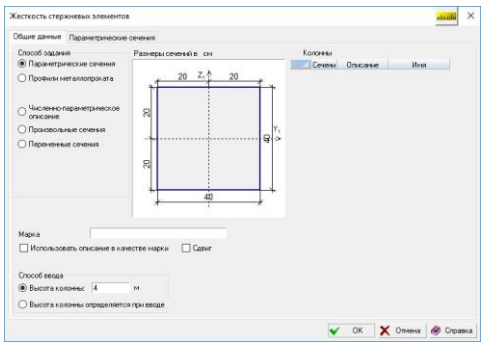


Рис. 9.13-4. *Диалоговое окно* **Жесткость стержневых элементов**

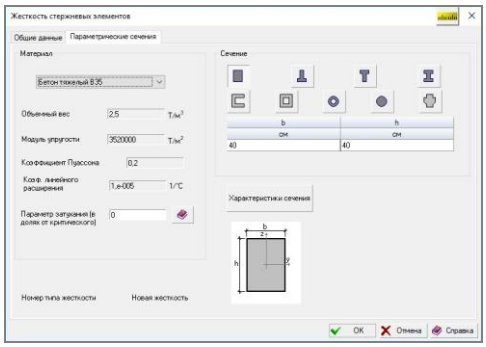


Рис. 9.13-5. *Диалоговое окно* **Жесткость стержневых элементов** *страница* **Параметрические сечения**

Сечение колонны и характеристики материала задаются на странице **Параметрические сечения** (рис. 9.13-5). Зададим квадратное сечение размером 40x40 см и нажмём кнопки **ОК** диалогового окна.

– (7) Установим курсор в рабочее поле и нажмём правую кнопку мыши. В появившемся меню **Выбор вида курсора** активируем опцию **Немедленное выполнение** и выберем курсор **Перекрестье с рамкой**.

– (8) Отметим с помощью прямоугольной рамки все узлы, лежащие на отметке 0,0, и получим схему, показанную на рис. 9.13-6.

– (9) Ввод балок —  выполняется всегда по двум узлам, между которыми протягивается «резиновая нить». Ограничений на положение балки в модели нет. Страницы **Общие данные**, **Параметрические сечения** и **Профили металлопроката** аналогичны соответствующим страницам, используемым при вводе колонн.

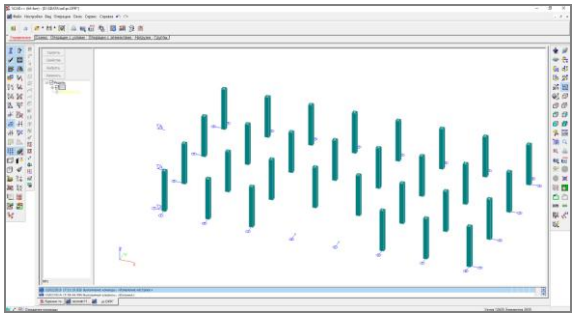


Рис. 9.13-6. *Модель после ввода колонн*

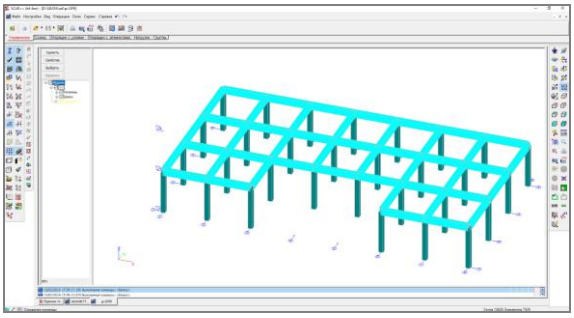


Рис. 9.13-7. *Модель после ввода балок*

Зададим для балок **прямоугольное** сечение 40×60 см и введем балки, связывая «резиновой нитью» верхние узлы крайних колонн по цифровым и буквенным осям. Полученная схема изображена на рис. 9.13-7.

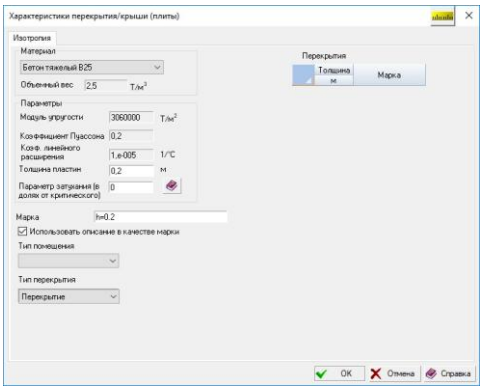



Рис. 9.13-8. *Диалоговое окно* **Характеристики перекрытия/крыши (плиты)**

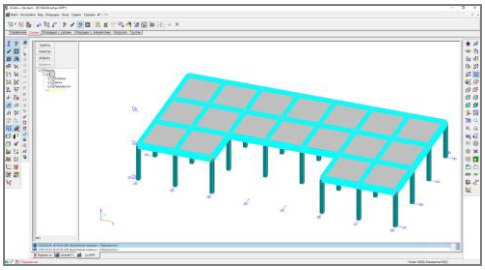


Рис. 9.13-9. *Модель после ввода перекрытия*

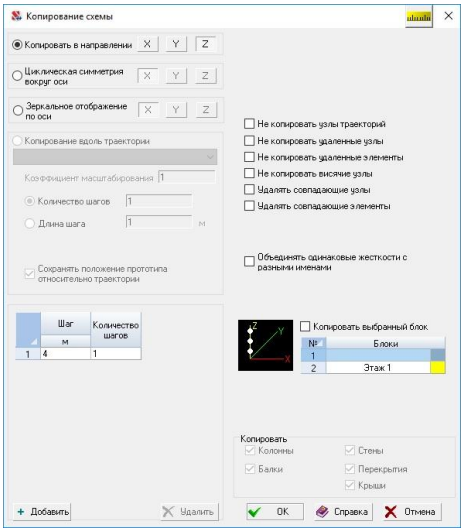



Рис. 9.13-10. *Диалоговое окно* **Копирование схемы**

– (10) После активации операции ввода перекрытия —  появляется диалоговое окно **Характеристики перекрытия/крыши (плиты)** (рис. 9.13-8). В этом окне задается имя перекрытия (или группы перекрытий), назначается его толщина и материал.

Зададим для перекрытия бетон В25 и толщину 0,2 м.

Перекрытие вводится как плоский многоузловой элемент произвольной формы. Ввод осуществляется с помощью «резиновой нити», которая протягивается от узла к узлу и завершается повторным указанием на первый узел перекрытия.

Положение введенного перекрытия показано на рис. 9.13-9.

– (11) Воспользуемся операцией копирования  для формирования второго этажа. В диалоговом окне **Копирование схемы** (рис. 9.13-10) назначим вид копируемого объекта — **Копировать выбранный блок**, укажем направление (Z) и шаг копирования (4 м), а также количество копий (1).

После назначения этих данных и выхода из диалогового окна нажатием кнопки **ОК** на экране появляется результирующая схема (рис. 9.13-11).

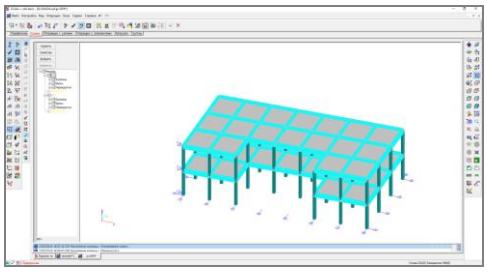


Рис. 9.13-11. *Модель после копирования второго этажа*

Полученная в результате схема будет включать два этажа высотой по 4 м.

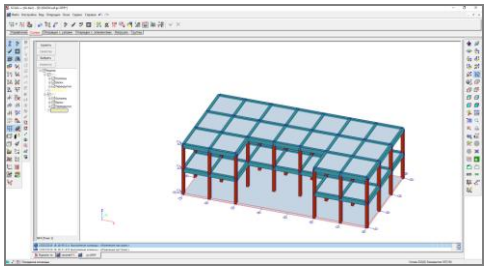


Рис. 9.13-12. *Окончательный вид модели в препроцессоре* **ФОРУМ**

– (12) Введем фундаментную плиту по правилам, приведенным выше (*действие 10*). Окончательный вид модели показан на рис. 9.13-12.

В результате нами сформирована достаточно типичная укрупненная модель, для построения которой использовались следующие операции:

- создание координационных осей и генерация на них узлов;
- задание параметров и ввод элементов колонн, балок и перекрытий;
- копирование блоков;
- объемное отображение модели.

– (13) Для перехода от укрупненной к конечно-элементной модели используется операция  — **Генерация результирующего проекта** в разделе **Схема** инструментальной панели. После активации этой операции появляется диалоговое окно **Генерация проекта SCAD** (рис. 9.10-3), в котором задаются параметры, необходимые для автоматической генерации конечно-элементной сетки. Здесь задается шаг разбиения контуров и шаг сетки для каждого вида элементов.

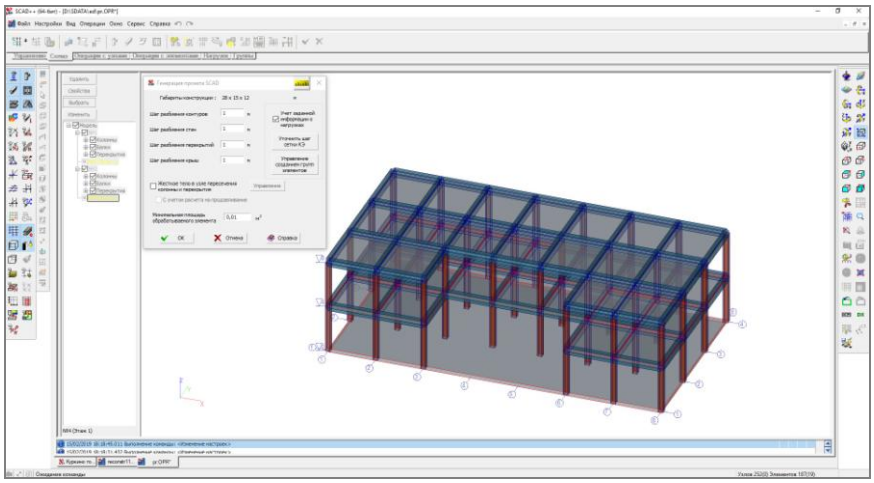


Рис. 9.13-13. *Генерация проекта* ***SCAD***




Рис. 9.13-14. *Диалоговое окно* **Результаты генерации**

Зададим шаг 1 м для контуров и всех видов элементов и нажмем кнопку **ОК** диалогового окна (рис. 9.13-13). После выхода из окна появляется стандартное окно **Сохранить как …**, в котором задается имя файла результирующей схемы.

В окне сообщений, которое сопровождает процесс генерации сетки, даются комментарии к выполняемым операциям и работает индикатор хода процесса.

Завершается генерация окном **Результаты генерации** (рис. 9.13-14). В нем сообщается о количестве элементов и узлов, полученных в результирующей схеме, а также приводится список плоскостных объектов, для которых не удалось по каким-либо причинам выполнить генерацию сетки.

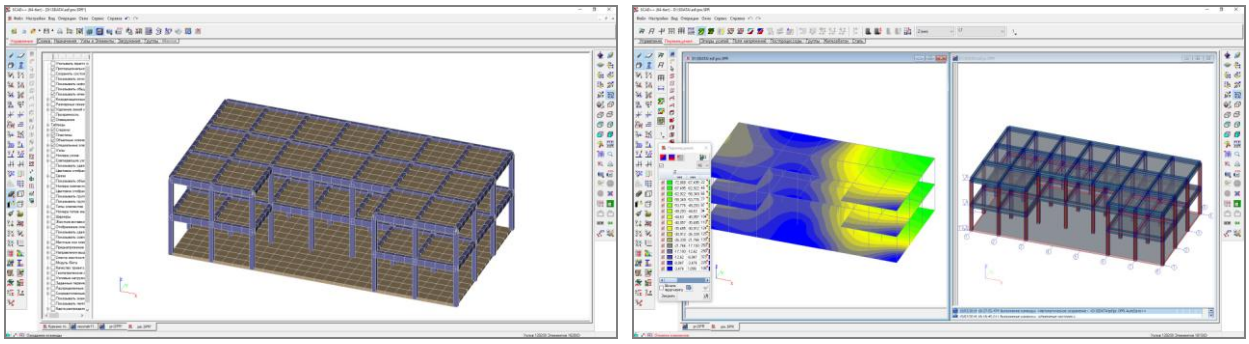


Рис. 9.13-15. *Расчетная схема в препроцессоре и постпроцессоре* **SCAD**

Если в окне **Результаты генерации** взвести маркер **Открыть в новом окне**, то выполнится автоматическая загрузка результирующей схемы. Обратите внимание, что из **ФОРУМ**а в **SCAD** передана вся информация о модели, включая координационные оси. На рис. 9.13-15 показана схема в препроцессоре **SCAD** и результаты расчета в постпроцессоре.

# 10. Управление отображением расчетной схемы

При создании расчетной схемы и анализе результатов могут быть использованы различные операции управления отображением. Сюда входят набор операций фрагментации и позиционирования изображения схемы, включенные в инструментальную панель **Визуализация**, а также различные фильтры управления отображением, позволяющие выделять и маркировать узлы и элементы схемы по заданным признакам. Кнопки управления фильтрами установлены в инструментальной панели **Фильтры отображения**.

## 10.1. Инструментальная панель Визуализация

Кнопки управления визуализацией расчетной схемы сосредоточены в перемещаемой инструментальной панели **Визуализация** (рис. 10.1-1). С их помощью выполняется поворот изображения схемы вокруг заданных осей, проецирование схемы на плоскости прямоугольной системы координат, а также различные операции по фрагментации.

Операции управления визуализацией имеют приоритет перед другими операциями. Это значит, что, если активен режим задания исходных данных (например, назначения связей) и активируется одна из операций визуализации, то управление будет передано последней. Ранее установленный режим остается активным, и после выполнения операции визуализации с ним можно продолжить работу.

Положение и размеры панели визуализации запоминаются и автоматически восстанавливаются после загрузки комплекса. Кнопка установки и скрытия панели визуализации  расположена в разделе **Управление** инструментальной панели.

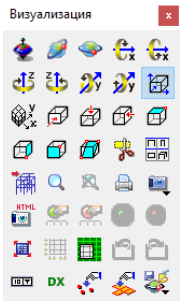



Рис. 10.1-1. *Инструментальная панель* **Визуализация**

### Поворот схемы



Поворот схемы вокруг заданной оси выполняется нажатием соответствующих кнопок инструментальной панели. При каждом нажатии выполняется поворот на один шаг, величину которого можно установить, воспользовавшись кнопкой **Установить угол вращения**  . Для поворота на фиксированный шаг ($30^0$, $45^0$, $60^0$, $90^0$, $120^0$, $135^0$, $180^0$) достаточно установить курсор на нужную кнопку поворота и, используя правую кнопку мыши, выбрать шаг из выпадающего списка. Чтобы вернуть изображение схемы в исходное положение, надо нажать кнопку  — **Восстановить исходную проекцию схемы**.

## Назначение шага поворота



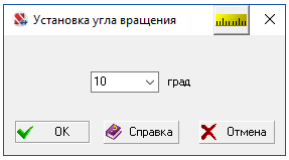



Рис. 10.1-2. *Диалоговое окно* **Установка угла вращения**

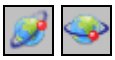
Для назначения шага поворота используется диалоговое окно **Установка угла вращения** (рис. 10.1-2). Значение угла может быть выбрано или назначено пользователем в окне списка. Введенный шаг действует и при активной операции непрерывного вращения.

## Непрерывное вращение схемы



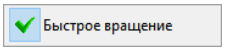
Если кнопка режима непрерывного вращения схемы *активна*, то нажатие любой из кнопок поворота будет вызывать непрерывное вращение схемы в заданном направлении. Для остановки вращения схемы следует отжать кнопку непрерывного вращения.

## Вращение мышкой (орбита)



Эти кнопки позволяют активировать режим, при котором перемещение мыши (при постоянно нажатой левой кнопке) приводит к вращению модели на экране. Направление, в котором должна вращаться схема, задается направлением перемещения мыши. Предусмотрена возможность свободного вращения, которая реализуется кнопкой  , а также поворот только вокруг оси Z общей системы координат и оси X экранной проекции — кнопка  (что чаще всего и используется при работе со схемами зданий и сооружений). Выполнить вращение схемы вокруг оси Z и оси X можно также не нажимая на кнопку  , а используя специальную комбинацию Shift+"средняя кнопка мыши". Центром вращения является центр фрагмента (включая разбивочные оси и начало общей системы координат, если заказано отображение этих объектов).

В выпадающем меню, которое появляется после нажатия правой кнопки мыши можно выбрать режим быстрого вращения (см. раздел 10.4)




## Проецирование схемы на координатную плоскость



Эти операции позволяют спроецировать изображение схемы на одну из плоскостей общей системы координат. Выбор плоскости проецирования выполняется с помощью соответствующих кнопок инструментальной панели. По умолчанию предусмотрены направления проецирования, изображенные на пиктограммах кнопок. Для того чтобы посмотреть на схему «с другой стороны», следует воспользоваться операцией поворота вокруг соответствующей оси, предварительно установив угол поворота 180°, или выбрать нужное положение схемы в выпадающем меню, которое появляется после нажатия правой кнопки мыши (рис. 10.1-3).

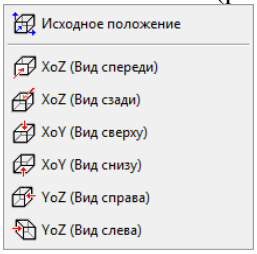



Рис. 10.1-3. *Меню проецирования*

Чтобы вернуть изображение схемы в исходное положение, надо нажать кнопку  — **Восстановить исходную проекцию схемы**.

## Изометрическая проекция



Эта операция позволяет получить изометрическую проекцию изображения схемы. При нажатии данной кнопки проекция строится так, что взгляд наблюдателя направлен в первый октант. Выбор других октантов становится доступен в выпадающем меню, которое появляется после нажатия правой кнопки мыши (рис. 10.1-4.)




Рис. 10.1-4. *Меню изометрических проекций*

Используемая нумерация октантов приведена на рисунке 10.1-5 .

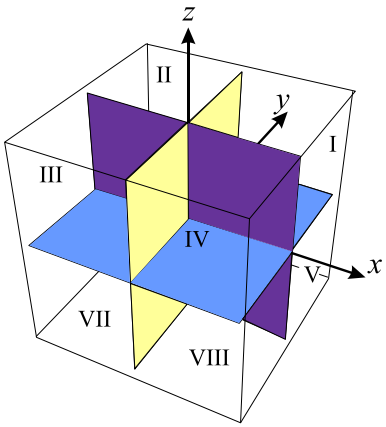
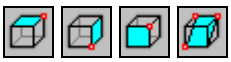



Рис. 10.1-5. *Нумерация октантов*

## Выделение плоского фрагмента



Для выделения фрагмента схемы, лежащего в плоскости, параллельной одной из плоскостей общей системы координат, необходимо нажатием соответствующей кнопки инструментальной панели назначить плоскость, а затем выбрать на схеме узел, принадлежащий этой плоскости. Допускается выбор не одного, а нескольких узлов, принадлежащих разным фрагментам схемы, в результате чего будут отмечены все эти фрагменты. В тех случаях, когда фрагмент лежит в произвольной плоскости, следует выбрать три узла, лежащие в плоскости фрагмента. Все элементы и узлы, попавшие в заданную плоскость, выделяются цветом. Если нажата кнопка  **Инвертная отметка операций фрагментирования**, то выделены будут все узлы и элементы, *не* попавшие в соответствующую плоскость.

Если выбор корректный, то для выполнения операции следует нажать зеленую кнопку , а в случае ошибки — красную кнопку , и повторить все описанные выше действия.

При настройке режимов работы курсора в инструментальной панели **Выбор узлов и элементов** (см. раздел 6.1) есть возможность отказаться от нажатия кнопки подтверждения, т. е. автоматически выполнять активные операции сразу после выбора объекта операции. Такой режим можно установить, активировав опцию **Немедленное выполнение** — кнопка на панели **Управление выбором**. В этом случае подтверждения фрагментации не требуется, и фрагмент будет выделен сразу после выбора узла (узлов).

Чтобы вернуться к изображению полной схемы, следует нажать кнопку — **Исходное отображение схемы**.

### Выделение фрагмента с помощью рамки

Для работы с произвольным фрагментом расчетной схемы следует воспользоваться операцией фрагментации с помощью рамки (**Фрагментация рамкой**). Рамка может быть прямоугольной или произвольной формы (рис. 10.1-6 и 10.1-7). После выбора операции автоматически устанавливается курсор прямоугольной рамки. Изменение вида рамки выполняется в меню, которое возникает при нажатии правой клавиши мыши.

Рамка произвольной формы задается последовательной фиксацией **левой** кнопкой мыши точек перелома области отсечения фрагмента. Замыкание области, т. е. соединение первой и последней точек выполняется автоматически после двойного щелчка **левой** кнопкой мыши. После установки рамки попавшие внутрь области отсечения узлы и элементы, все узлы которых находятся внутри этой области, будут выделены цветом.

Если нажата кнопка **Инвертная отметка операций фрагментирования**, то выделены будут все узлы и элементы, *не* попавшие внутрь рамки.

Если фрагмент выбран правильно, подтверждение выполняется нажатием зеленой кнопки . Отказ от фрагментации выполняется нажатием красной кнопки .

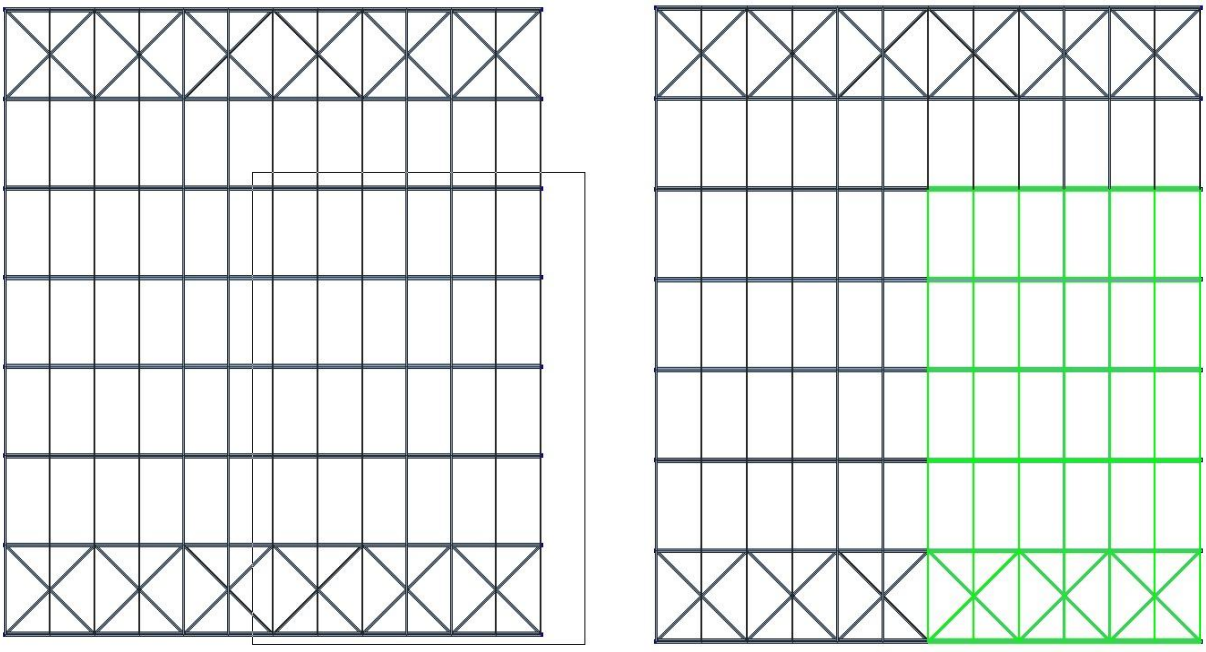


Рис. 10.1-6. *Фрагментация прямоугольной рамкой*

Для выделения фрагмента прямоугольной рамкой его следует охватить рамкой таким образом, чтобы все узлы и элементы, которые должны попасть во фрагмент, находились внутри рамки.

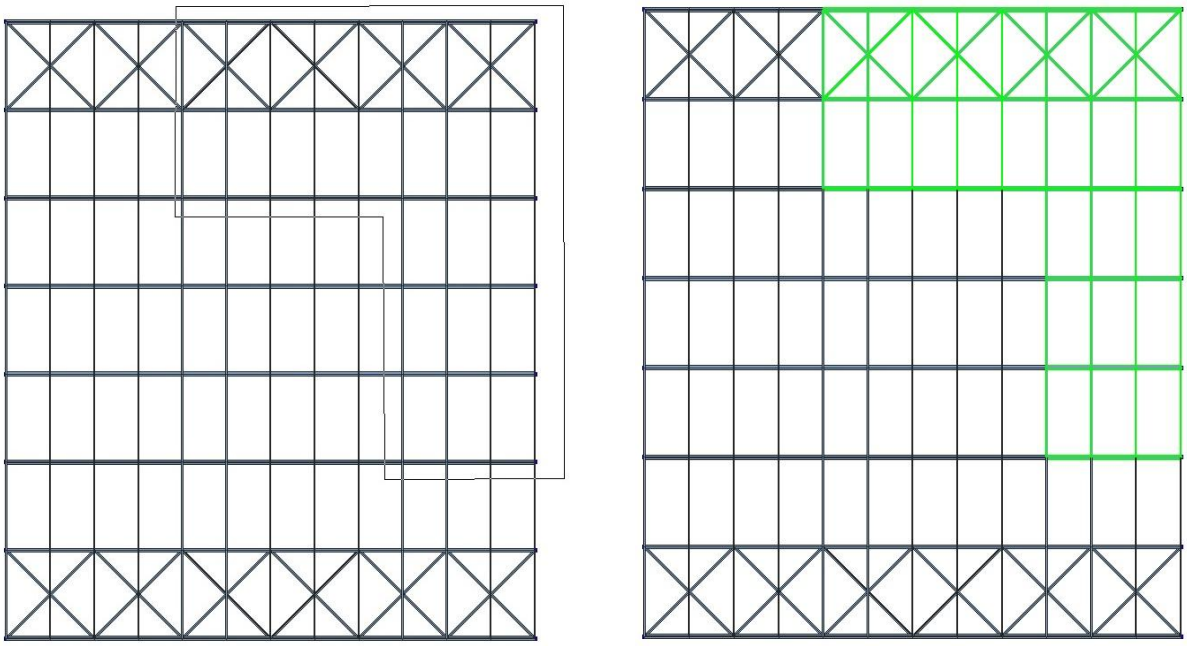


Рис. 10.1-7. *Фрагментация рамкой произвольной формы*

Если при настройке режимов работы с курсорами в инструментальной панели **Выбор узлов и элементов** установлена опция **Немедленное выполнение**, то подтверждения фрагментации не требуется, и фрагмент будет выделен сразу после замыкания рамки. Во фрагмент попадут только те элементы, все узлы которых находятся внутри области рамки, а также отдельные узлы, попавшие в эту область.

Если ни один элемент не попал во фрагмент, то на экране будут только узлы, увидеть которые можно после нажатия кнопки  — **Узлы** на панели **Фильтры отображения** (рис. 10.2-1).

Чтобы вернуться к изображению полной схемы, следует нажать кнопку  — **Исходное отображение схемы**.

## Отсечение на проекциях



Эта операция позволяет выделить фрагмент расчетной схемы путем последовательного отсечения рамкой области на проекциях схемы на координатные плоскости. После ее инициализации на экран выводятся четыре окна, в трех из которых отображаются проекции схемы на плоскости XOZ, XOY и YOZ, а в четвертом — общий вид схемы и меню управления отсечением (рис. 10.1-8).

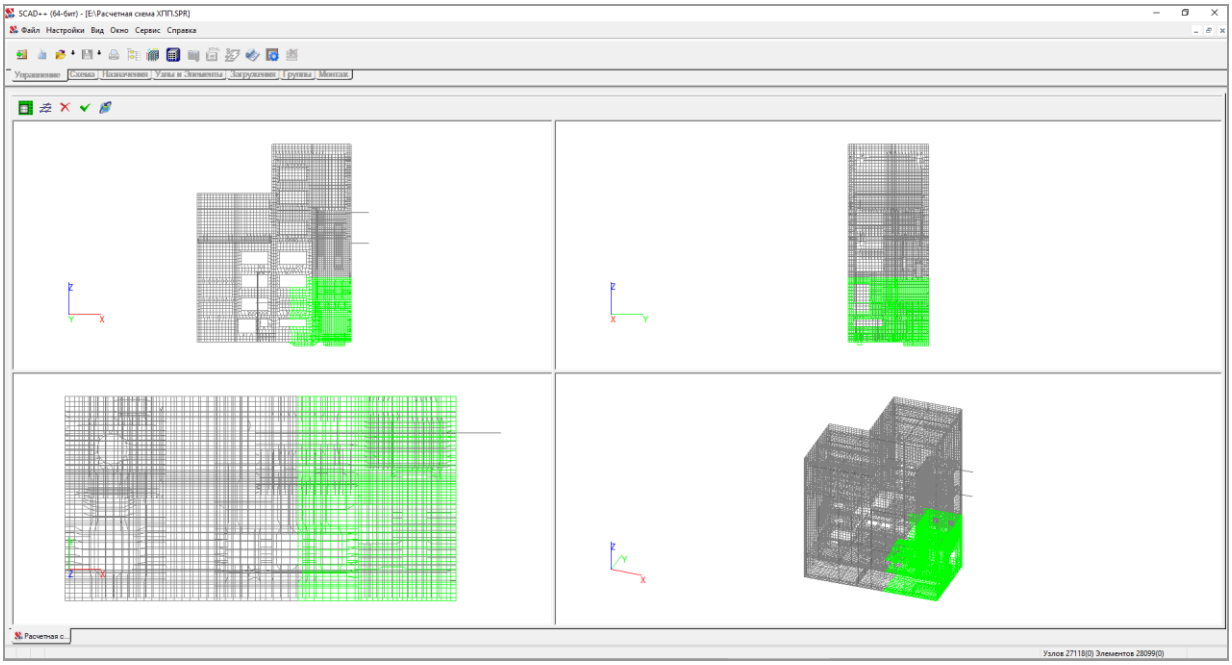


Рис. 10.1-8. *Окна с проекциями расчетной схемы*

Правила работы с операцией отсечения на проекциях следующие:

- окна проекций независимы, и любое из них может быть увеличено или уменьшено;
- отсечение можно выполнять в любом порядке, многократно и в любом из окон;
- установка курсора-рамки (прямоугольной или произвольной формы) и работа с курсорами аналогичны функции выделения фрагмента с помощью рамки;
- часть расчетной схемы, попавшая во фрагмент, выделяется цветом;
- режим отсечения может быть инверсным, в этом случае во фрагмент попадет все, что не вошло в выделенную область;
- прямое и инверсное отсечение могут многократно чередоваться;
- установка режимов отсечения и выход из функции выполняется с помощью инструментальной панели.



Рис. 10.1-9. *Инструментальная панель управления отсечением*

Инструментальная панель управления отсечением (рис. 10.1-9) позволяет установить режимы инвертирования выбора —  и отображения свободных (не принадлежащих элементам) узлов —  , повернуть схему —  , отказаться от фрагментации —  или вывести в рабочее поле экрана полученный фрагмент —  .

Выход из режима отсечения на проекциях осуществляется кнопкой  инструментальной панели. Чтобы вернуться к изображению полной схемы, следует нажать кнопку  — **Исходное отображение схемы**.

## Фрагментация на разбивочных осях



Если при формировании расчетной схемы были заданы координационные (разбивочные) оси, то выделение фрагмента можно выполнить, назначив область ***отсечения***, границами которой будут указанные имена осей и/или отметки уровня. Выбор области отсечения выполняется в диалоговом окне **Фрагментация на разбивочных осях** (рис. 10.1-10).

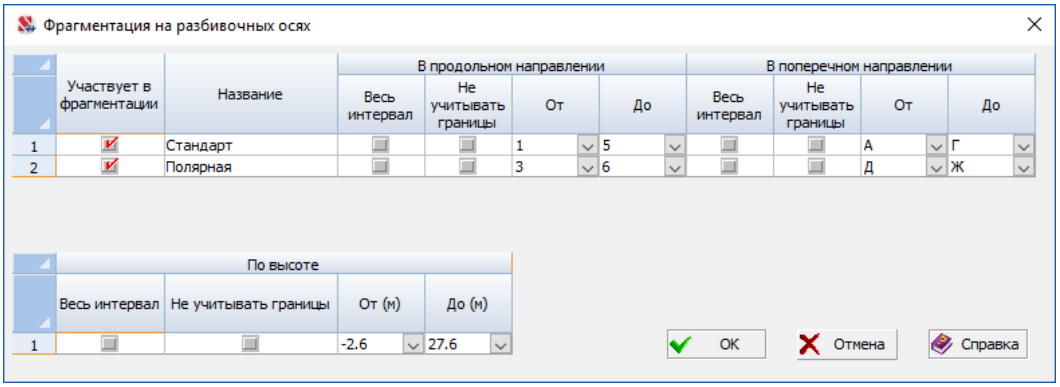



Рис. 10.1-10. *Диалоговое окно* **Фрагментация на разбивочных осях**

Для того чтобы выделить нужную часть схемы, следует для соответствующих участков разбивочных осей:

- установить маркер **Участвует в фрагментации**;
- если нужно выделить не весь интервал отметок для некоторого участка (а только часть) — снять маркер **Весь интервал**;
- для продольного и поперечного направлений с помощью колонок **От** и **До** выбрать отметки начала и конца;
- произвести аналогичные действия с высотными отметками.

В случае если использована опция **Весь интервал**, а часть модели выходит за рамки заданных осей (например, не задавались отметки уровня), то для полного отображения модели в заданном направлении следует активировать опцию **Не учитывать заданные границы интервала**.

## Операции отмены и возврата в режимах фрагментации расчетной схемы



С помощью этих операций можно неоднократно выполнять переход от одного фрагмента расчетной схемы к другому и обратно в порядке выполнения фрагментации. Фрагментация может выполняться путем отсечения части схемы прямоугольной рамкой или полигоном, отсечением на проекциях, путем выделения заданной плоскости или с помощью цветовых шкал.

## Увеличение изображения



Операция **Увеличение изображения** позволяет увеличить изображение расчетной схемы или её фрагмента. В отличие от фрагментации «окном», где на экран выводится только выделенная часть схемы, эта операция позволяет работать со всей схемой. Масштаб изображения изменяется таким образом, что выделенная часть схемы занимает все поле экрана (рис. 10.1-11), а доступ к остальной, невидимой, части, осуществляется путем перемещения изображения схемы (следует

сдвигать изображение при нажатой средней кнопке мыши). Таким образом, появляется возможность перемещать изображение на экране.

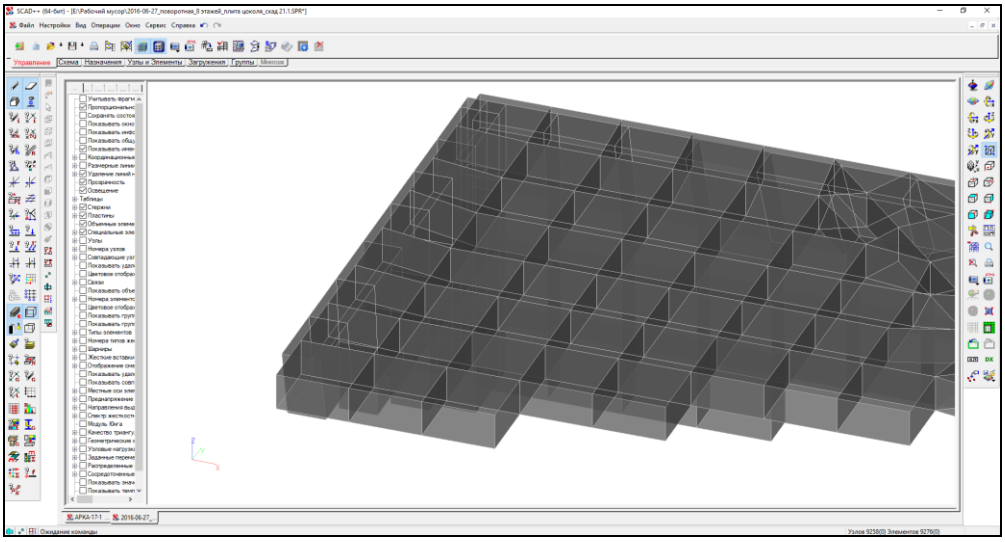


Рис. 10.1-11. *Крупный план*

После инициализации операции нажатием соответствующей кнопки установка увеличенного изображения выполняется аналогично выделению прямоугольного фрагмента схемы.

Если пропорции прямоугольника близки к пропорциям окна (соотношение высоты и ширины), то полученное изображение части схемы будет соответствовать фрагменту, попавшему в рамку. В противном случае на экран выведется фрагмент несколько больший ожидаемого.

Кнопка **Восстановление исходного размера**  возвращает изображению его первоначальный размер.

## Полноэкранный режим работы



Полноэкранный режим работы используется при работе с большими расчетными схемами и позволяет увеличить площадь рабочего поля за счет временного отказа от визуализации панели задач Windows, меню и заголовка окна. При этом изображение занимает весь физический экран. Повторное нажатие кнопки возвращает окно в исходное состояние. Если окно не максимального размера, то активация операции приводит к его максимизации.

## Режим отображения




В программе предусмотрен выбор режимов отображения. Первый режим основан на технологии DirectX. Эта технология обеспечивает быструю отрисовку расчетных моделей. Высокое быстродействие DirectX во многом обеспечивается за счет того, что технология поддерживается всеми современными видеокартами. К ее недостаткам можно отнести тот факт, что в некоторых случаях оцифровка и нанесение на изображение другой текстовой информации может быть не очень качественным. DirectX используется по умолчанию (за исключением тех случаев, когда **SCAD** обнаруживает проблемы с поддержкой DirectX — например, при отсутствии в операционной системе нужной версии DirectX). В этом случае происходит *автоматическое* переключение на второй режим отображения, основанный на "родной" для Windows технологии GDI. Пользователь может сам сменить режим отображения. Для этого следует нажать на кнопку инструментальной панели и из выпадающего меню выбрать альтернативный режим. Переход на режим GDI рекомендуется только в том случае, если требуется изменить отображение текстовой информации. В других случаях это делать нежелательно, поскольку быстродействие GDI намного ниже быстродействия DirectX.

Следует также помнить, что в режиме GDI нельзя получить изображение с эффектами прозрачности, освещенности и перспективы.

### Фрагментация при помощи дерева



Для проектов типа **ФОРУМ** данная операция приводит к появлению вида с деревом проекта, в котором можно исключить отдельные блоки (или части блоков) из фрагмента модели.

### Фрагментация выбранных объектов



Если на расчетной схеме есть селектированные узлы и/или элементы, то нажатие этой кнопки приводит к тому, что на экране останется фрагмент, содержащий только отмеченные объекты: отмеченные узлы, отмеченные элементы и принадлежащие им узлы.

### Фрагментация неселектированных объектов



Если на расчетной схеме есть селектированные узлы и/или элементы, то нажатие этой кнопки приводит к тому, что на экране останется фрагмент, содержащий только объекты, которые не выбраны, то есть из текущего фрагмента будут удалены отмеченные элементы, отмеченные узлы и примыкающие к этим отмеченным узлам элементы.

### Поиск узлов с заданными характеристиками



Эта операция используется для выбора узлов, занимающих определенное положение в схеме или заданных их номерами. Поиск выполняется по следующим факторам:

- расстояние от точки с заданными координатами;
- расстояния от указанных узлов;
- расстояние от указанных элементов;
- поиск среди узлов с указанными номерами.

При поиске узлов указанные факторы могут использоваться в любой комбинации. В результате будут отмечены узлы, отвечающие одновременно всем перечисленным факторам. Зона поиска может назначаться в виде сферы (маркер **Радиус**) или параллелепипеда (маркер **Диапазон**). Параллелепипед строится изменением координат рассматриваемого узла или точки на величины $\pm\Delta x$, $\pm\Delta y$, $\pm\Delta z$.

**Расстояние от точки с координатами** — выполняется поиск узлов, лежащих в окрестностях точки с указанными координатами;

**Поиск среди узлов с номерами** — выполняется поиск узлов по их номерам;

**Расстояние от узлов** — выбираются все узлы, которые лежат в окрестности указанных в списке узлов по правилам, описанным для операции **Расстояние от точки с координатами**;

**Расстояние от указанных элементов** — выполняется поиск узлов, лежащих в окрестности элемента. В зависимости от опции, определяющей область поиска, оценка принадлежности *i*-го узла окрестности указанного элемента выполняется относительно узлов элемента (опция — **Расстояние от узлов**) или любой точки, принадлежащей элементу (опция — **Расстояние от тела**). Узел считается удовлетворяющим условиям поиска, если внутрь зоны поиска, в центре которой лежит рассматриваемый узел, попал хотя бы один из узлов элемента (**Расстояние от узлов**) или хотя бы одна точка, принадлежащая элементу (**Расстояние от тела**).

Управление выбором выполняется в диалоговом окне, которое появляется после активации операции. В зависимости от состояния маркера **Отмечать элементы** результатом поиска могут быть только выбранные узлы или узлы с прилегающими к ним элементами.

При активном маркере **Инверсно** выбираются все объекты, свойства которых не совпадают с указанными в диалоговом окне.

Выбор объектов будет выполнен после выхода из диалогового окна нажатием кнопки **OK**.

### Поиск элементов с заданными номерами



Эта операция выполняет поиск элементов по их номерам. Выбор элементов будет выполнен после выхода из диалогового окна нажатием кнопки **OK**.

### Сохранение образа экрана



После активации данной операции появляется меню, в котором следует выбрать формат копируемого изображения (векторный или растровый) и указать способ его хранения — в виде файла или в буфере обмена.

Операция позволяет получить метафайл (расширение **.wmf**), расширенный метафайл (расширение **.emf**), *placeable* метафайл (расширение **.wmf**) или растровое изображение в форматах ***.bmp**, ***.png**, .... Полученное изображение можно включить в отчет, например, при подготовке результатов расчета в **Документаторе** или в редакторе MS Word.

Если выбрано сохранение на диск, то появляется стандартное диалоговое окно, в котором следует выбрать нужный формат, установить имя файла и наименование каталога, в который он записывается (по умолчанию запись производится в рабочий каталог с результатами расчета).

### Сохранение текущего отображения расчетной схемы в формате HTML




Отображение расчетной схемы, в том числе и все виды графического представления результатов расчета, можно записать в формате HTML. Это позволяет просматривать изображение, используя средства визуализации HTML-файлов различных браузеров, которые имеют поддержку WebGL. Для управления отображением используются кнопки мыши и колесо, в том числе:

- ***вращение схемы*** на экране выполняется путем перемещения мыши **при нажатой левой кнопке**;
- ***уменьшение изображения*** может быть выполнено **вращением колеса мыши «от себя»**;
- ***увеличение изображения*** может быть выполнено **вращением колеса мыши «к себе»**;
- ***смещение изображения*** на экране выполняется путем перемещения мыши **при нажатом колесе**.

Если полученное изображение нужно разместить на веб-сайте или передать на другой компьютер, то помимо HTML-файла следует также скопировать директорию x3dom, которая создается в том же расположении, что и HTML-файл.

Следует отметить, что отображение изображений с большим количеством текстов (оцифровка номеров узлов/элементов, оцифровка результатов, ...) является задачей чрезвычайно трудоемкой для всех существующих браузеров и может приводить к их зависанию или отказу отобразить необходимую информацию. Поэтому сохранение изображения в этой ситуации следует производить только для сравнительно небольших моделей или фрагментов моделей.

### Сохранение и восстановление ракурса модели на экране



При формировании расчетной схемы и анализе результатов расчета, как правило, используется относительно небольшое количество «удачных» ракурсов отображения модели или ее фрагментов на экране. Повторение в последующих сеансах работы со схемой нужного ракурса возможно при

сохранении информации о нем в виде файла с данными. При этом указанная информация является универсальной и может быть использована при работе с любой другой расчетной схемой.

Для сохранения информации о текущем положении следует выполнить следующие действия:

- используя фильтры управления отображением модели, подобрать требуемый ракурс и нажать кнопку **Сохранить/Восстановить положение модели** —  ;
- в появившемся меню выбрать раздел **Сохранение положения модели**, после чего в стандартном диалоговом окне **Сохранить как…** выбрать директорию и задать имя файла;
- выйти из диалогового окна нажатием кнопки **Сохранить**.

Для восстановления нужного положения модели следует:

- нажать кнопку **Сохранить/Восстановить положение модели** —  ;
- в появившемся меню выбрать имя файла;
- после загрузки информации схема или ее фрагмент займут на экране положение, соответствующее выбранному ракурсу.

## 10.2. Отображение информации на расчетной схеме

### Общие замечания по отображению информации на схеме

Управление отображением информации на расчетной схеме выполняется с помощью фильтров. Они позволяют установить не только вид отображаемой информации, но и правила визуализации. Управление фильтрами сосредоточено в перемещаемой инструментальной панели **Фильтры отображения** (рис. 10.2-1).

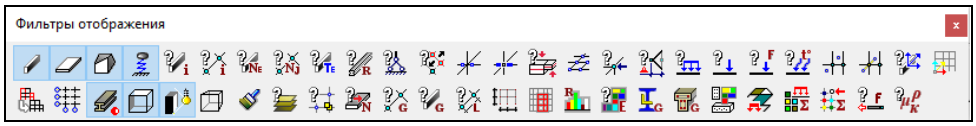



Рис. 10.2-1. *Панель* **Фильтры отображения**

Кроме операций управления отображением на панели фильтров установлены кнопки, которые часто используются при работе со схемой. К ним относятся, например, кнопки получения информации о конкретном узле или элементе, отмены выбора всех объектов, определения расстояния между заданными узлами и др.

Предусмотрена настройка многих фильтров, которая выполняется в многостраничном диалоговом окне **Настройка фильтров отображения информации** (рис. 10.2-2). Для вызова окна следует установить курсор на панели **Фильтры отображения** и нажать ***правую*** кнопку мыши. В появившемся окне настройка осуществляется включением/отключением ряда различных установок на одноименных страницах фильтров. Например, в фильтрах **Стержни** и **Пластины** можно устанавливать правила отображения, в соответствии с которыми будут показаны элементы, занимающие в схеме определенное положение (см. рис. 10.2-21).

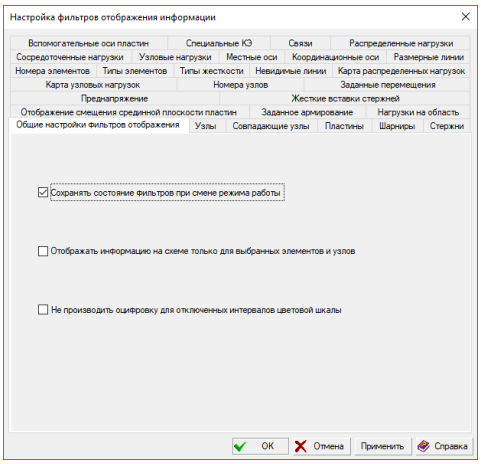



Рис. 10.2-2. *Диалоговое окно*
**Настройка фильтров отображения информации**
(*страница* **Общие настройки фильтров отображения**)

На рис. 10.2-2 показана страница **Общие настройки фильтров отображения** данного окна, которая позволяет:

- зафиксировать состояние фильтров при смене режимов работы комплекса;
- отображать информацию при нажатых фильтрах не для всех элементов или узлов расчетной схемы, а только для отмеченных. Так же отразится на настройке отображения активизация/отключение маркера **Отображать информацию на схеме только для выбранных элементов и узлов**;
- отказаться от оцифровки элементов/узлов, которые соответствуют отключенным интервалам цветовой шкалы.

Необходимо обратить внимание на некоторые временные аспекты визуализации, связанные с настройкой фильтров. Даже при использовании режима отображения DirectX вывод текстовой информации производится относительно долго. Чем больше опций настройки будет установлено одновременно для различных фильтров, тем дольше будут выполняться функции вывода схемы на экран.

Для небольших расчетных схем время вывода увеличится незначительно. Но, если схема содержит десятки тысяч узлов и элементов, то пользователю придется набраться терпения, прежде чем она будет выведена на экран с учетом всех настроек.

Если пользователь изменил настройку того или иного фильтра, то соответствующая кнопка будет иметь дополнительный индикатор, свидетельствующий об изменении стандартных настроек. Например, фильтр отображения стержневых элементов (в стандартном и модифицированном состояниях) выглядит так:  ,  .

Кнопка **Показать/Скрыть панель визуализации**  расположена в разделе **Управление** инструментальной панели.

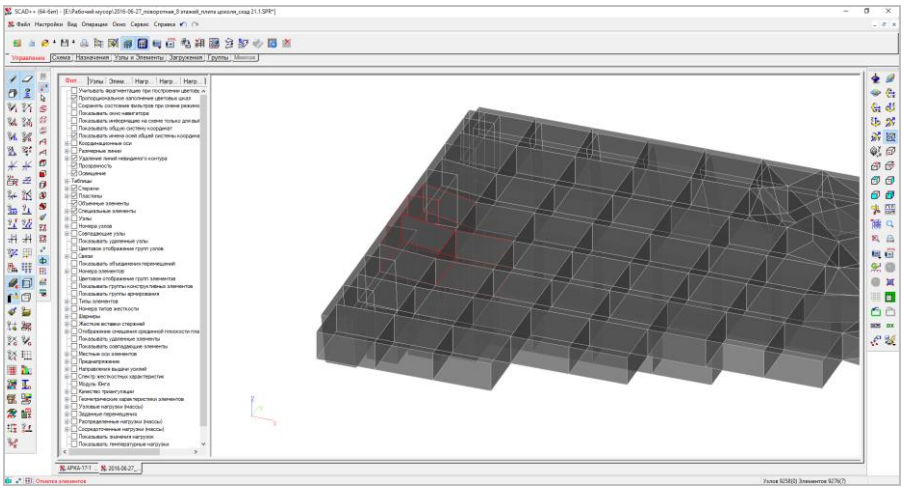


Рис. 10.2-3. *Дерево настройки фильтров отображения*

Настройки фильтров отображения продублированы в виде дерева, расположенного в левой области окна каждой задачи. Путем перемещения линии-разделителя дерево может быть скрыто или развернуто на нужную ширину (рис. 10.2-3). Настройки фильтров, выполненные в дереве, дублируются на панели фильтров и наоборот. Кроме того, предусмотрена возможность отключения дерева, которая доступна из меню **Вид** и должна быть выполнена до загрузки первой задачи.

## Сохранение и восстановление состояния фильтров

Текущее состояние фильтров может быть сохранено в файлах с расширением **.SCADFilters**. Таким образом, появляется возможность создания серии настроек фильтров и активации нужного варианта в зависимости от режима работы (пре- или постпроцессор, стержневая или комбинированная модель и т.п.). Запоминается состояние фильтров отображения и визуализации результатов. При начальной загрузке задачи все фильтры будут в исходном состоянии.

Работа с файлами состояния фильтров выполняется из меню **Настройки** в разделах **Сохранить состояние фильтров…** (сохранение текущего состояния) и **Восстановить состояние фильтров…** (чтение нужного варианта настройки фильтров). Доступ к последним нескольким файлам возможен прямо из меню.

**При переходе к новым версиям SCAD не гарантируется совместимость форматов файлов сохранения настроек фильтров. Если совместимость не обеспечена, то при попытке загрузить файл будет выдано соответствующее сообщение. В этом случае файлы необходимо создать заново.**

## Настройка вывода цифровой информации

Вид, размер, стиль и цвет шрифта цифровой информации на расчетной схеме назначаются на странице **Установка шрифтов** (рис. 10.2-4) диалогового окна **Параметры**, которое вызывается из пункта **Настройки** раздела меню ***Настройки*** (или кнопкой  инструментальной панели).

Описание данного окна приведено в разделе 35.3.

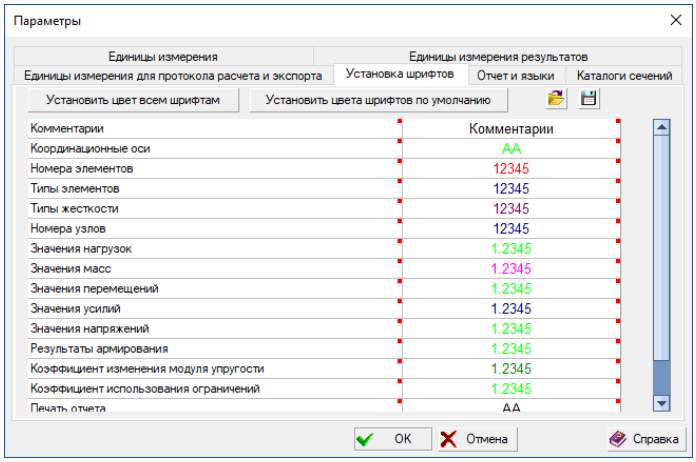



Рис. 10.2-4. *Диалоговое окно* **Параметры**, *страница* **Установка шрифтов**

## Печать расчетной схемы



Любое установленное на экране отображение расчетной схемы может быть выведено на печать. Кнопки вызова режима печати находятся в разделе **Управление** инструментальной панели и на панели **Визуализация**. В диалоговом окне **Текст комментариев для печати** (рис. 10.2-5), которое появляется после активации режима, можно ввести информацию, попадающую в специальное поле печатаемого документа.

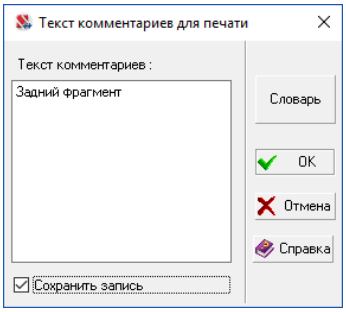



Рис. 10.2-5. *Диалоговое окно* **Текст комментариев для печати**

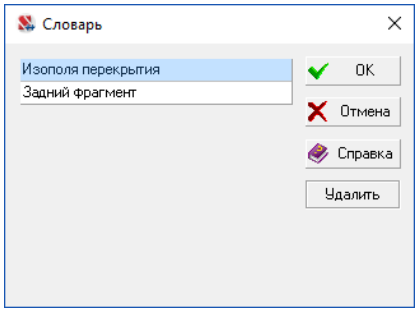



Рис. 10.2-6. *Диалоговое окно* **Словарь**

Настройка принтера выполняется в диалоговых окнах программ-драйверов, поставляемых производителями оборудования вместе с принтерами. Следует обратить внимание на такие параметры настройки, как расположение изображения на бумаге: *Книжный формат* (по вертикали) или *Альбомный* (по горизонтали), а также на управление цветом и разрешающей способностью. При выводе на цветной принтер изополя и изолинии выводятся в назначенных на экране цветах.

Если взведен маркер **Сохранить запись**, то текст комментария будет сохранен и в будущем его можно не вводить повторно, а воспроизвести, используя кнопку **Словарь** данного диалогового окна (рис. 10.2-6). В этом окне следует выбрать строку с нужным текстом и нажать **OK**; после этого выбранный текст будет перенесен в качестве текста комментария. Удалить ненужные тексты можно с помощью одноименной кнопки.

**При цветной печати обратите особое внимание на цвет текстовой информации (номера узлов и элементов, типы жесткости, значения перемещений и т. п.). Светлые цвета (белый, желтый, светло-серый и др.) на бумаге не видны. Следует назначить такой цвет шрифта, который будет виден не только на экране, но и на бумаге.**

Печать изображения осуществляется в соответствии с выбранным режимом отображения (DirectX или GDI). Соответственно, если выбран режим DirectX, то программа произведет печать растрового изображения, а в случае GDI — векторного. Как правило результаты печати будут практически одинаковыми, но при выводе в PDF-файл (и большом увеличении в программе просмотра PDF-файлов) окончательные изображения могут существенно отличаться. Качество растрового отображения в PDF-файлах можно повысить, если в настройках соответствующего PDF-принтера поднять разрешение выводимого файла, отключить понижение разрешения для изображений, отключить сжатие изображений с потерями и т. д. Если же все эти действия не дадут нужного результата, можно попробовать перед печатью сменить режим отображения на GDI (при этом следует помнить об ограничениях GDI-режима, таких как отсутствие поддержки освещенности, прозрачности, перспективы и т. д.).

## Начальная установка фильтров



Если в процессе работы возникает необходимость отменить все сделанные ранее настройки фильтров, можно воспользоваться кнопкой **Восстановить исходное состояние фильтров отображения**. После ее нажатия все фильтры отключаются, а их настройки переводятся в состояние, установленное для них по умолчанию.

## Отображение информации об узлах

В этом разделе рассматриваются функции фильтров отображения, предназначенные для работы с расчетной схемой, связанной с отображением узлов и информацией о них.

### *Вывод номеров узлов*



С помощью этого фильтра на расчетную схему выводятся номера узлов. Настройки фильтра (рис. 10.2-7) позволяют заказать вывод номеров и/или имен узлов, а также координат узлов.

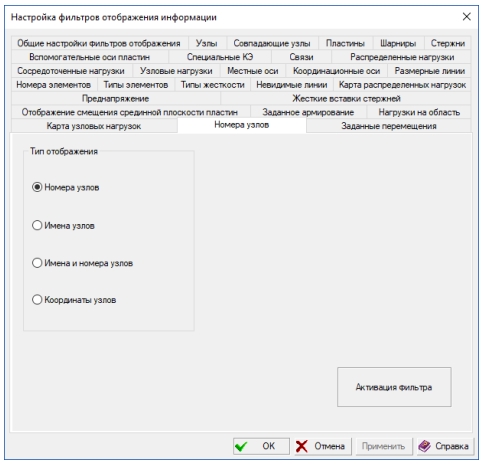



Рис. 10.2-7. *Страница* **Номера узлов**

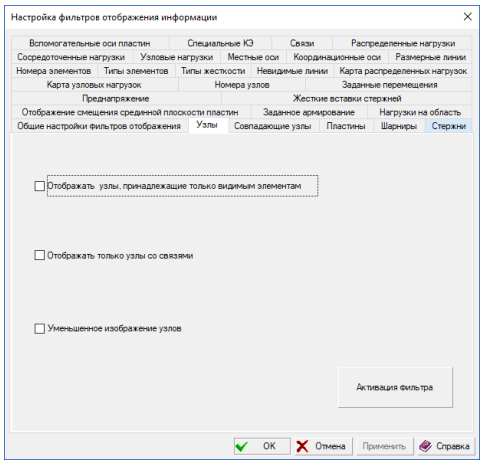



Рис. 10.2-8. *Страница* **Узлы**

### Отображение узлов



Узлы отображаются на расчетной схеме в виде окаймленных квадратов, цвет которых зависит от выполняемой операции. По умолчанию приняты следующие цвета маркировки узлов:

- отображение узла в исходном виде — синий;
- выбранный узел в режимах назначения параметров — красный;
- выбранный узел в режимах фрагментации — зеленый;
- удаленные и совпадающие узлы — желтый.

В некоторых режимах работы, например, сборки схемы из подсхем, ввода узлов, фрагментации и др. этот фильтр активируется автоматически, но может быть отключен пользователем. Автоматическое включение отображения узлов можно отключить, деактивировав одноименный маркер в диалоговом окне **Настройка параметров среды**, которое вызывается аналогичной командой из раздела меню ***Настройки***.

На странице **Узлы** окна **Настройка фильтров отображения информации** (рис. 10.2-8) можно назначить следующие правила вывода узлов на экран:

- отображение узлов, принадлежащих только видимым элементам;
- отображение только узлов со связями;
- уменьшенное отображение узлов.

Размер изображения узла можно изменить и с помощью соответствующей операции на странице **Расчетная схема** окна **Настройка параметров среды**.

### Отображение удаленных узлов



Если не выполнялась операция упаковки данных, то в схеме в скрытом виде присутствуют удаленные узлы и элементы. С помощью этого фильтра можно «высветить» удаленные узлы. При необходимости восстановление узлов выполняется соответствующей операцией раздела **Узлы и Элементы** (если активировать эту операцию, то фильтр показа удаленных узлов будет активирован автоматически).

Настройка фильтра не предусмотрена.

### Отображение совпадающих узлов



После активации этого фильтра выполняется поиск совпадающих узлов, которые по умолчанию маркируются на схеме желтым цветом. Напомним, что под «совпадающими» понимаются такие узлы, расстояние между которыми меньше значения, определенного при настройке параметров среды.

При настройке фильтра (рис. 10.2-9) можно изменить точность оценки совпадающих узлов, отказаться от показа совпадающих узлов, для которых задано объединение перемещений и отказаться от показа совпадающих узлов, которые используются в одном элементе.

## Отображение связей

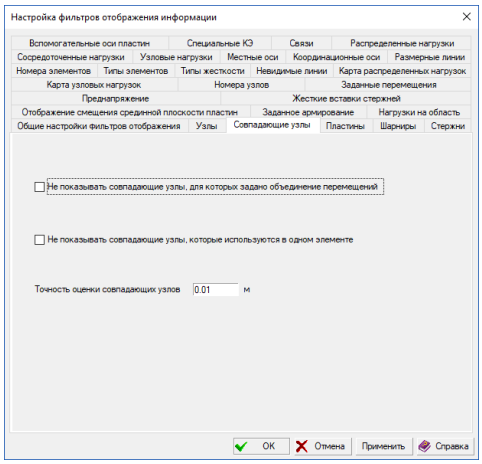



Рис. 10.2-9. *Страница* **Совпадающие узлы**

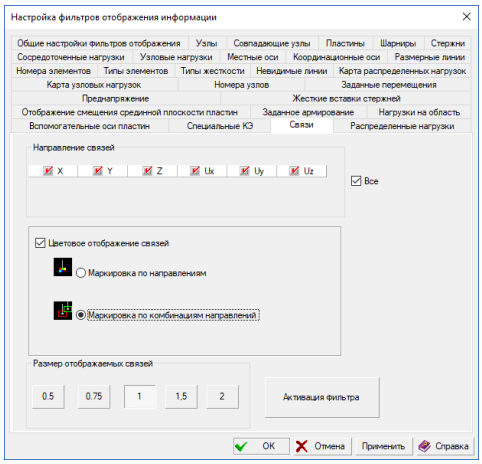



Рис. 10.2-10. *Страница* **Связи**

Связи в узлах расчетной схемы отображаются прямоугольниками. На странице настройки фильтров **Связи** (рис. 10.2-10) можно выбрать размер прямоугольников в долях от максимально допустимого.

Управление фильтром позволяет показать на схеме связи только по указанным направлениям и выбрать режим цветового отображения связей с маркировкой по направлениям или по комбинациям направлений.

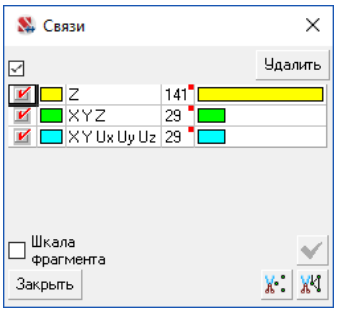



Рис. 10.2-11. *Цветовая шкала отображения* **Связей**

При цветовой маркировке связей возможно следующее их отображение:

- прямоугольники с цветовыми полями, цвет которых указывает на направление назначенных связей. Верхние три цветовых поля в прямоугольниках соответствуют связям по линейным направлениям, а нижние — по угловым. Настройка цветовой шкалы выполняется в диалоговом окне **Настройка цветов** (см. раздел 10.5);
- цветовая шкала связей (рис. 10.2-11), где представлены все заданные комбинации связей в узлах. Используя возможности цветовой шкалы, можно, например, отобразить только узлы с выбранными комбинациями (включив/отключив маркер) или удалить связи с узлов нажатием кнопки **Удалить**.

В графе, отмеченной красным квадратом, указано количество узлов со связями данного типа, а в следующей графе – эта же информация в виде диаграммы.

## Отображение групп объединения перемещений

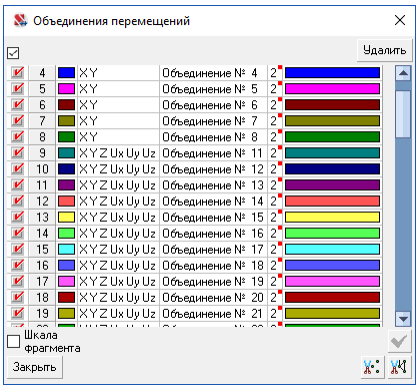



Рис. 10.2-12. *Цветовая шкала режима отображения объединения перемещений*

Активация этого фильтра вызывает цветовую шкалу (рис. 10.2-12), в которой каждой группе узлов с объединенными перемещениями соответствует свой цвет и строка с указанием направлений, по которым выполнено объединение. Работа с цветовой шкалой выполняется по описанным выше правилам. На расчетной схеме узлы, входящие в группы, маркируются прямоугольниками соответствующего цвета.

Используя кнопку **Удалить**, можно отменить объединение перемещений для узлов из выбранных групп.

В графе, отмеченной красным квадратом, указано количество узлов, входящих в группу объединения, а в следующей графе — эта же информация в виде диаграммы.

## Определение расстояния между узлами

С помощью этой операции можно определить расстояние между двумя узлами расчетной схемы. После ее активации появляется диалоговое окно **Расстояние между узлами** (рис. 10.2-13), в котором отображаются результаты измерения.

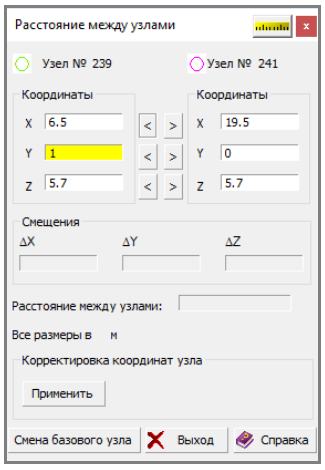



Рис. 10.2-13. *Диалоговое окно* **Расстояние между узлами**

Для определения расстояния следует выбрать на схеме первый узел (назовем его базовым), который маркируется желтым кольцом, а затем второй (он маркируется сиреневым кольцом). В соответствующих полях ввода отображаются координаты выбранных узлов, а также смещения между узлами по трем координатам и расстояние между ними.

Для определения расстояния между базовым узлом и другим узлом расчетной схемы достаточно выбрать на схеме этот узел, не активируя повторно фильтр. Для смены базового узла используется одноименная кнопка в диалоговом окне. После ее нажатия можно назначить новый базовый узел.

В режиме ввода исходных данных возможна корректировка координат узлов, т. е. перенос их в точки с другими координатами. Для ее выполнения следует ввести в поля ввода координат новые значения и нажать кнопку **Применить**.

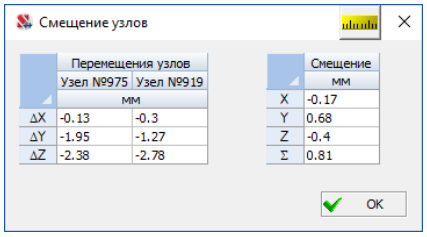



Рис. 10.2-14. *Диалоговое окно* **Смещение узлов**

Назначение значений координат одного узла другому узлу выполняется с помощью набора кнопок, установленных между полями отображения координат узлов диалогового окна **Расстояние между узлами** (рис. 10.2-13).

Переносить координаты можно только между значениями одного направления. В противном случае следует воспользоваться вводом с клавиатуры. Для выполнения операции следует нажать кнопку, установленную около поля ввода изменяемых координат, и после дублирования значения в поле другого узла нажать кнопку **Применить**. Результаты присвоения отображаются на расчетной схеме.

Для отмены операции используется стандартная операция **Отмена**  .
Если данная операция активирована в постпроцессоре, то появляется кнопка **Смещение**, с помощью которой можно получить в специальном диалоговом окне (рис. 10.2-14) перемещения выбранных узлов, а также смещения по каждой из координатных осей и суммарное смещение.

### Информация об узле



Эта операция позволяет получить полную информацию об указанном узле, в том числе о координатах, связях, нагрузках, примыкающих элементах и перемещениях (при анализе результатов текущего загружения). Управление операцией сосредоточено в диалоговом окне **Информация об узле** (рис. 10.2-15).

Для получения информации следует нажать кнопку фильтров и установить в диалоговом окне способ выбора узла на схеме. Для поиска нужного узла можно ввести его номер в поле **Номер узла** и нажать кнопку **Поиск** или указать курсором на узел, если предварительно была нажата кнопка **Указание на схеме**. Выбранный узел маркируется на схеме зеленым кружком, и информация о нем попадает в окно.

В группу **Координаты** выводятся координаты узла, в группу **Перемещения** — значения перемещений (только в режиме анализа результатов).

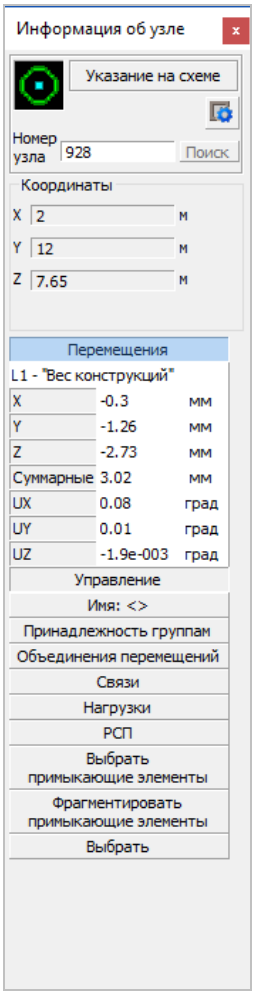



Рис. 10.2-15. *Диалоговое окно* **Информация об узле**

В режиме формирования расчетной схемы координаты узла могут быть изменены непосредственно в окне **Информация об узле**. Внесенные изменения фиксируются нажатием кнопки **Применить**. Кнопка **Связи** активирует диалог, в котором можно увидеть (а в препроцессоре и поменять) связи в выбранном узле.

Нажатием кнопки **Нагрузки** можно вызвать диалоговое окно **Нагрузки на узел** (рис. 10.2-16) с информацией обо всех нагрузках, приложенных к узлу в каждом загружении. В этом режиме есть возможность выборочного удаления нагрузок из текущего (активного) загружения или изменения значения нагрузки. Для удаления нужно выбрать в списке строку с удаляемой нагрузкой, имеющую признак **Текущее** (загружение), и нажать кнопку **Удалить**.

Величина выбранной в списке нагрузки выводится в одноименное информационное окно. Для корректировки величины нагрузки следует отметить ее в списке, изменить значение в поле ввода и нажать кнопку **Изменить**.

Факт удаления или изменения величины нагрузки будет зафиксирован только в том случае, если загружение сохранить, воспользовавшись кнопкой  в разделе **Загружения**.

Кнопки **Реакции в связях** и **РСР** (расчетные сочетания реакций в связях) будут доступны в тех случаях, когда выполнялись соответствующие расчеты, и в исследуемом узле была приложена связь. После их активации в одноименных диалоговых окнах будут представлены таблицы с результатами указанных расчетов.

Если в результате расчета были получены расчетные сочетания перемещений, то в окне **Информация об узле** будет доступна кнопка **РСП**, нажатие которой открывает доступ к таблице с сочетаниями перемещений.

Аналогично, если в результате расчета были получены расчетные сочетания продавливания, то в окне **Информация об узле** будут доступны кнопки **РС продавливания, Нагрузки**

**продавливания** и **Нагрузки продавливания от комбинаций**, нажатие которых открывает доступ к таблицам с результатами.

При нажатии кнопки **Фрагментировать примыкающие элементы** создается фрагмент, в котором находятся только все примыкающие к узлу элементы. Нажатие кнопки **Выбрать примыкающие элементы** приводит к тому, что все примыкающие к узлу элементы становятся селектированными.

При необходимости анализируемый узел может быть удален или маркирован как выбранный. Для выполнения этих операций используются соответствующие кнопки.

Кнопка **Принадлежность группам** вызывает диалоговое окно, в котором содержится таблица со всеми группами узлов, которым принадлежит выбранный узел. Сняв отметку возле соответствующей группы и нажав кнопку **OK**, можно исключить узел из группы. Маркер **Показывать все группы** позволяет получить список всех групп узлов. Если поставить отметку возле группы, которой узел не принадлежит и нажать кнопку **OK**, то узел станет элементом этой группы.

Если в расчетной схеме есть группы объединения перемещений, то аналогично группам узлов можно просмотреть и/или изменить принадлежность выбранного узла той или иной группе объединения перемещений (рис. 10.2-18).

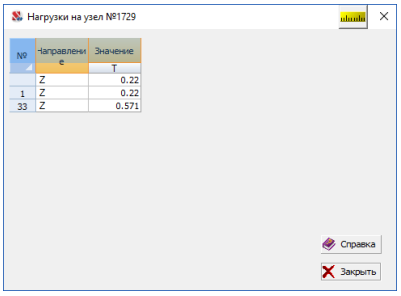



Рис. 10.2-16. *Диалоговое окно* **Нагрузки на узел**

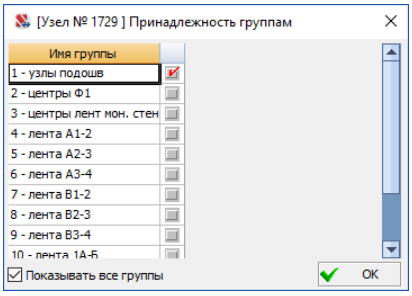



Рис. 10.2-17. *Диалоговое окно* **Принадлежность группам**

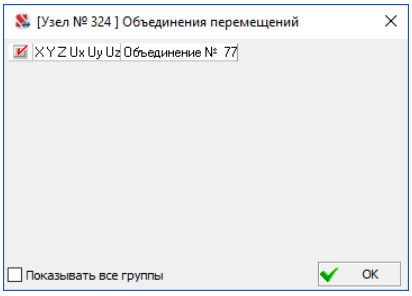



Рис. 10.2-18. *Диалоговое окно* **Объединение перемещений**

Кнопка **Принадлежность нагрузкам на область,...** вызывает диалоговое окно, в котором содержатся данные о принадлежности выбранного узла нагрузкам на область, траекториям и маршрутам движения (рис. 10.2-19).

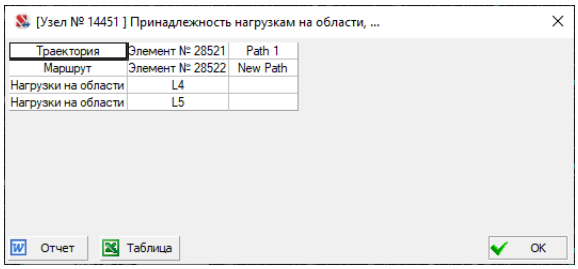



Рис. 10.2-19. *Диалоговое окно* **Принадлежность нагрузкам на область,...**

Эта информация может быть, в частности, полезна при анализе причин, по которым тот или иной ”висячий” узел не удаляется при упаковке данных.

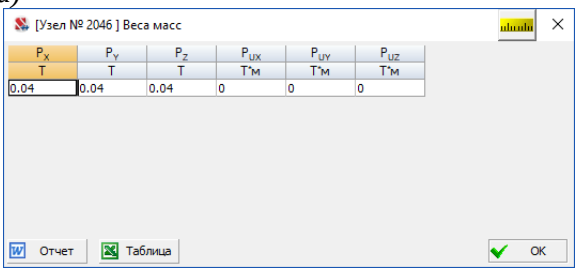
При графическом анализе результатов расчета для текущего загружения (формы колебаний, формы потери устойчивости, комбинации загружений) для выбранного узла будут отображены значения перемещений и углов поворота. Если анализируется прямое интегрирование уравнений движения, то появляется возможность просмотра графиков изменения компонент перемещений узла во времени (см. главу 15), а при выполнении нелинейного анализа — истории перемещения по шагам нелинейного загружения (при условии, что количество шагов с сохраненными результатами больше единицы). В постпроцессоре также доступны кнопки, которые позволяют получить таблицы с реакциями в связях (см. раздел 12.6), расчетными сочетаниями перемещений

(см. раздел 18.8), и нагрузки от фрагмента схемы (см. раздел 23.3). Если текущим является динамическое загружение, то одноименные кнопки позволяют получить табличное представление весов узловых **масс**, динамических **сил** и **ускорений** (рис. 10.2-20).

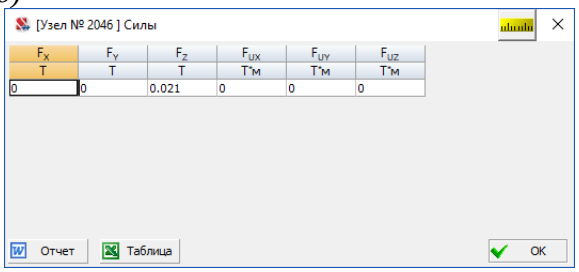
Диалоговое окно **Информация об узле** может занимать любое место на экране (и вне рабочего поля **SCAD**). Его можно не закрывать при выполнении операций назначения или корректировки геометрии схемы.

В тех случаях, когда набор кнопок или информация, предусмотренные по умолчанию в диалоговом окне **Информация об узле**, включают не используемые или редко используемые позиции, предусмотрена возможность отказаться от них, т.е настроить диалоговое окно на отображение только необходимых данных. Для этого используется операция **Настройки**, которая вызывается нажатием одноименной кнопки в рассматриваемом окне или нажатием правой кнопки мыши. В результате активации операции появляется меню, с помощью которого можно как отказаться от появления тех или иных позиций, так и восстановить ранее исключенные из окна. Выполненные настройки будут использоваться в дальнейшем при работе во всех окнах и со всеми моделями. Если пользователь изменил настройку, то кнопка **Настройки** будет иметь дополнительный индикатор, свидетельствующий об изменении стандартных настроек.

*а)*




*б)*




*в)*

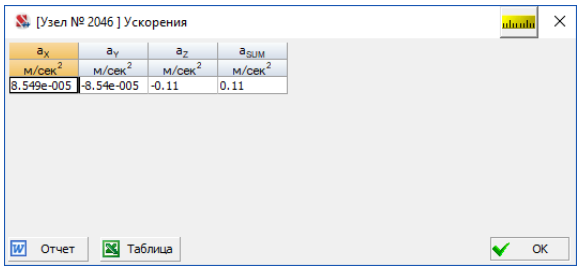



Рис. 10.2-20. *Динамические данные об узле: а) узловые массы; б) динамические силы; в) ускорения*

## Отображение информации об элементах

С помощью фильтров отображения для конечных элементов можно вывести следующую информацию:




Рис. 10.2-21. *Положение атрибутов в стержневых и пластинчатых элементах*

- номера, типы элементов, номера и имена типов жесткости;
- наличие шарниров и жестких вставок в стержневых элементах;
- направления местных осей элементов и осей выдачи усилий в пластинчатых и объемных элементах;
- эпюры прогибов и усилий, сочетания усилий, арматура для стержневых и пластинчатых элементов (в информации об элементе в режиме анализа результатов).

Большая часть информации может быть выведена как в цифровом виде, так и в виде цветовой шкалы. Заметим, что одновременно может быть заказан вывод только одной цветовой шкалы для элементов.

Если активировать фильтры с атрибутами элементов, то заказанная информация будет выведена в соответствии со схемой, изображенной на рис. 10.2-21. «Читабельность» информации будет во многом зависеть от размеров элементов на экране. При малых размерах чаще всего атрибуты не попадут в поле «своей» пластины или стержня. В этих случаях рекомендуется выделить фрагмент с нужным участком схемы или установить режим **Увеличение изображения** на панели **Визуализация**.

Текущая настройка фильтров сохраняется до закрытия проекта или до выхода в дерево проекта. В исходном состоянии (по умолчанию) информация выводится в числовом виде на все узлы и элементы схемы.

### *фильтры отображения элементов*



Эти кнопки фильтров предназначены для включения или отключения отображения элементов определенного вида — стержней, пластин, объемных или специальных, а при работе с укрупненными элементами — колонн, балок, стен, плит и крыш. В исходном состоянии все кнопки активны, т. е. на схеме отображаются все виды элементов. При их отключении соответствующие виды элементов на схеме отображаться не будут.

Более детальная настройка фильтров выполняется в многостраничном диалоговом окне **Настройка фильтров отображения информации** на страницах **Стержни** и **Пластины** (рис. 10.2-22), где устанавливаются правила отображения, в соответствии с которыми будут показаны элементы, занимающие в схеме определенное положение в пространстве.

На странице настройки отображений специальных конечных элементов (рис. 10.2-23) находятся маркеры различных видов специальных элементов, активация или сброс которых позволяет отображать на экране только необходимые типы элементов. Для связей конечной жесткости дополнительно предусмотрены маркеры выбора направления связи.

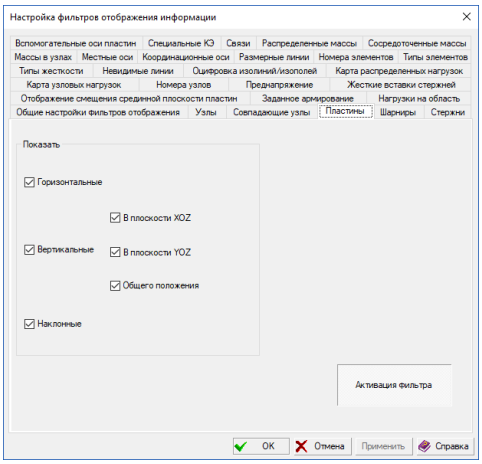



Рис. 10.2-22. *Диалоговое окно* **Настройка фильтров отображения информации**, *страница* **Пластины**

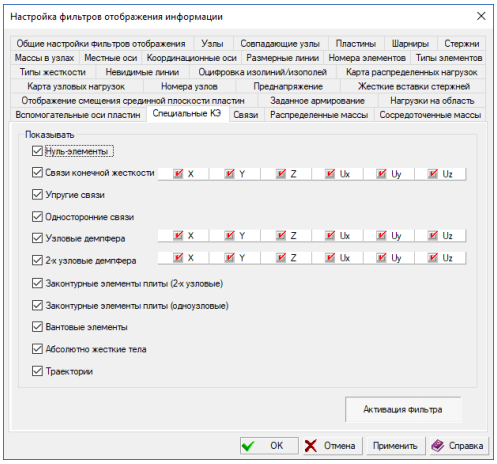



Рис. 10.2-23. *Диалоговое окно* **Настройка фильтров отображения информации**, *страница* **Специальные КЭ**

### Отображение номеров элементов



Управление выводом номеров элементов находится на странице **Номера элементов** окна настройки фильтров (рис. 10.2-24). На этой странице можно назначить отображение на схеме номеров как в зависимости от определенного вида элементов, так и от положения элементов в схеме.

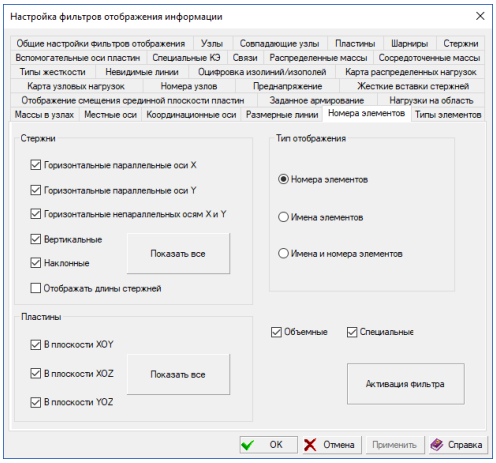



Рис. 10.2-24. *Страница* **Номера элементов**

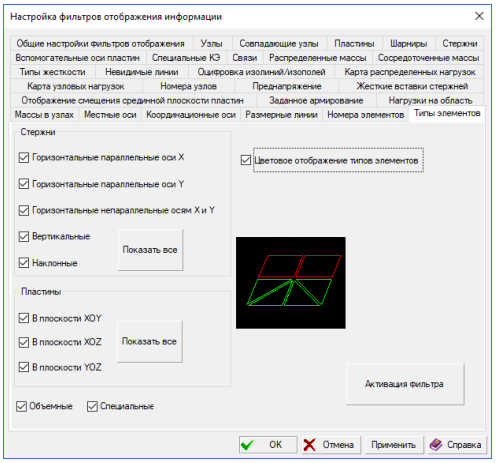



Рис. 10.2-25. *Страница* **Типы элементов**

Маркеры группы **Стержни** предназначены для работы со стержневыми элементами и позволяют назначить вывод номеров стержней в зависимости от их положения в схеме. Если активен маркер **Отображать длины стержней**, то вместо номеров элементов выводятся значения их длин.

Маркеры группы **Пластины** служат для назначения правил вывода номеров пластинчатых элементов в зависимости от принадлежности последних координатным плоскостям. Кроме того, имеются два маркера для включения или отключения отображения номеров объемных и специальных элементов. Можно также установить опции вывода имен элементов, вместо номеров или одновременного отображения имен и номеров.

Назначение вида, цвета и размера шрифта выполняется на странице **Установка шрифтов** (см. раздел 35.3).

### Отображение типов элементов



Управление фильтром вывода типов элементов находится на странице **Типы элементов** окна настройки фильтров (рис. 10.2-25). С помощью элементов управления этой страницы можно установить правила отображения информации в зависимости от вида элементов и их положения в схеме. Кроме того, есть возможность использовать цвет для индикации на схеме различных элементов по их типу.

Для настройки фильтра предусмотрены четыре группы маркеров. Первые три группы позволяют настроить фильтры аналогично фильтру номеров элементов. Маркеры четвертой группы определяют правила цветовой индикации.

В режиме цветовой индикации (активен маркер **Цветовое отображение типов элементов**) есть возможность присвоить каждому типу конечного элемента свой цвет. При этом выводится окно **Типы КЭ** с цветовой шкалой (рис. 10.2-26). Элементы управления этого окна позволяют выполнить следующие операции:

- включить или выключить все кнопки активации цветовой шкалы (кнопка **Поставить/снять отметку** );
- применить на схеме установленную комбинацию кнопок цветовой шкалы (кнопка **Применить**  );

- фрагментировать схему таким образом, чтобы на ней остались только элементы, тип которых совпадает с активными маркерами цветовой шкалы (кнопка **Фрагментировать**  );
- отключить режим цветовой индикации (кнопка **Закрыть**).

*а*)

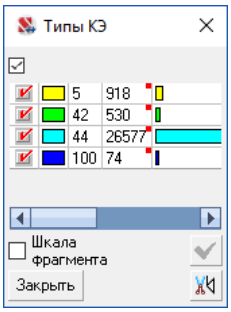
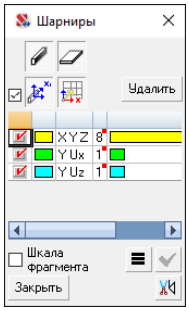



Рис. 10.2-26. *Цветовая шкала индикации типов элементов*

*б*)



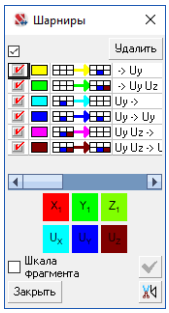




Рис. 10.2-27. *Цветовые шкалы шарниров а) в виде цветовых маркеров; б) путем окраски стержней*

В графе, отмеченной красным квадратом, указано количество элементов, имеющих соответствующий тип, а в следующей графе — эта же информация в виде диаграммы.

Для изменения цвета следует дважды щелкнуть курсором на цветовое поле и выбрать новый цвет в стандартном окне среды Windows. Двойной щелчок мыши на ячейку с типом конечного элемента вызывает диалоговое окно, в котором можно произвести замену типа КЭ.

При отображении номеров типов элементов в числовой форме назначение вида, цвета и размера шрифта выполняется на странице **Установка шрифтов** (см. раздел 35.3).

### Отображение шарниров



Независимо от заданного направления(ий) шарниры отображаются на схеме в виде колец в концах гибкой части стержневых элементов или возле узлов (в зависимости от параметров шарниров).

В настройках фильтра предусмотрено цветовое отображение шарниров и элементов, содержащих шарниры (рис. 10.2-27). В первом случае каждая комбинация освобождаемых связей на концах гибкой части элементов получает свой цвет в цветовой шкале и на схеме. Во втором случае на схеме цветом маркируются стержни в зависимости от заданных в них комбинаций шарниров.

В графе, отмеченной красным квадратом, указано количество шарниров данного вида в схеме, а в следующей графе — эта же информация в виде диаграммы.

### Отображение удаленных элементов



Если не выполнялась операция упаковки данных, то в схеме в скрытом виде присутствуют удаленные узлы и элементы. С помощью этого фильтра можно «высветить» удаленные элементы. При необходимости восстановление элементов выполняется соответствующей операцией раздела **Узлы и Элементы** (если активировать эту операцию, то фильтр показа удаленных элементов будет активирован автоматически).

Настройка фильтра не предусмотрена.

### Отображение совпадающих элементов



После активации этого фильтра выполняется поиск совпадающих элементов, которые по умолчанию маркируются на схеме желтым цветом. Напомним, что под «совпадающими» понимаются такие элементы одного типа, у которых совпадают все узлы.

### Отображение типов жесткости



Настройка фильтра отображения типов жесткости выполняется на странице **Типы жесткости** (рис. 10.2-28) аналогично настройке других фильтров.

Если назначить цветовое отображение типов жесткости, то получим шкалу, изображенную на рис. 10.2-29, где каждому типу жесткости, кроме цвета, соответствует кнопка с пиктограммой, на которой изображены вид элементов или сечение стержневых элементов. В следующей графе записываются следующие характеристики типа жесткости:

- стержневые элементы, заданные явным описанием сечения, — габариты сечения или марка сечения по сортаменту металлопроката;
- стержневые элементы, заданные численным описанием жесткости — продольная жесткость;
- пластинчатые элементы — толщина элемента;
- объемные элементы — модуль упругости материала;
- жесткие тела, упругие связи, связи конечной жесткости — направление связи;
- односторонние связи — жесткость связи и т. д.

Если типам жесткости были заданы имена, то они выводятся в графе, следующей за характеристиками. Последние две графы включают данные о количестве элементов, имеющих этот тип жесткости, представленные в числовой форме и в виде диаграммы.

Стержневые элементы, жесткость которых задана через характеристики параметрических сечений, будут иметь пиктограммы в соответствии с типом сечения —  ,  и т. п. Сечения из базы металлопроката отображаются «своими» пиктограммами:  ,  , … Если жесткости описаны численно, а также для специальных конечных элементов кнопка будет иметь вид  . При использовании численно-параметрического описания жесткостей на пиктограммах одновременно присутствуют изображения сечения и значок численного описания —  . Для сечений, которые были подготовлены с помощью программ **Конструктор сечений**, **Консул** или **ТОНУС** —  . Желтым цветом (по умолчанию) на схеме и пиктограммой  в шкале будут отмечены элементы, которым не назначены жесткостные характеристики.

Для всех типов пластинчатых элементов используется общий символ —  , а объемных —  .

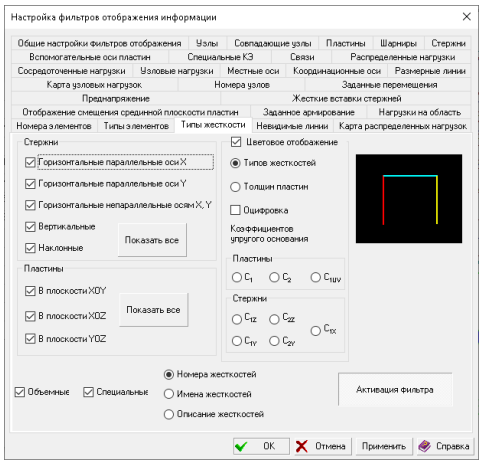



Рис. 10.2-28. *Страница* **Типы жесткости** *диалогового окна* **Настройка фильтров отображения информации**

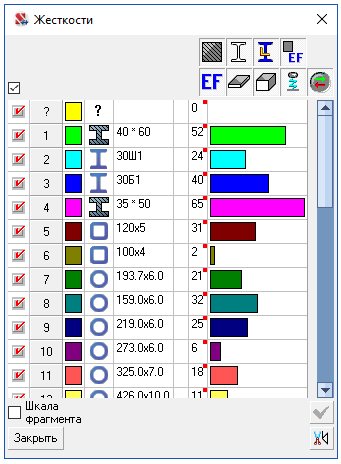



Рис. 10.2-29. *Цветовая шкала индикации номеров типов жесткости*

Нажатие этих кнопок вызывает диалоговые окна с соответствующими жесткостными характеристиками, в которых можно выполнить ***только корректировку*** параметров типа жесткости. Они отличаются от аналогичных окон, вызываемых в разделе **Назначения** инструментальной панели и подробно описанных в разд. 7.1 тем, что у них отсутствует кнопка **ОК**, а запоминание новых параметров выполняется кнопкой **Заменить и выйти**.

При цветовом отображении в окне **Настройка фильтров отображения информации** можно заказать вывод цветовых шкал толщин плоскостных элементов, коэффициентов упругого основания $C_1$ или $C_2$, $C_{X1}$пластин или коэффициентов $C_{1Y}$, $C_{2Y}$, $C_{1Z}$, $C_{1UV}$ или $C_{2Z}$ стержней (рис. 10.2-30). В цветовой шкале коэффициентов упругого основания можно непосредственно в диалоговом окне шкалы переключаться на просмотр коэффициентов другого типа (например, переходить от просмотра коэффициентов Винклера $C_1$ на просмотр коэффициентов Пастернака $C_2$).

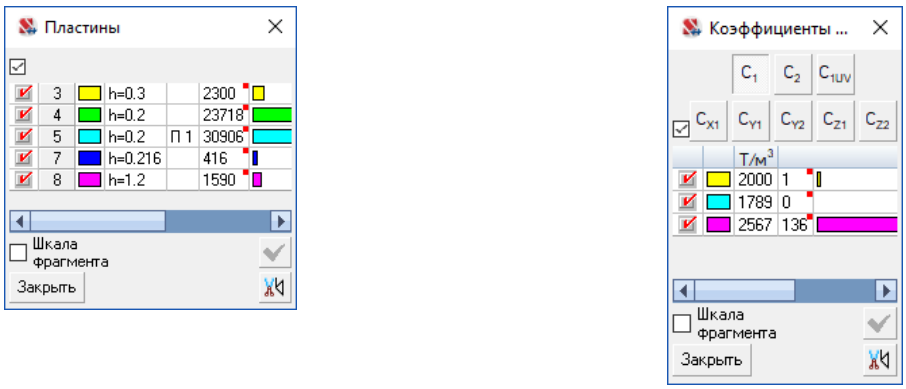



Рис. 10.2-30. *Цветовые шкалы индикации толщин пластин и коэффициентов упругого основания*

Кроме того, в настройках имеется возможность заказать вывод имен типов жесткостей или описание жесткостей на расчетной схеме, а также одновременный вывод цветового отображения и номеров типа жесткости (оцифровка).

Отметим, что вывод цветовой схемы жесткостей (как и других характеристик) возможен не только на «проволочной» схеме, но и при включенном фильтре удаления линий невидимого контура, в том числе и с отображением сечений стержней и толщин пластин (рис. 10.2-31).

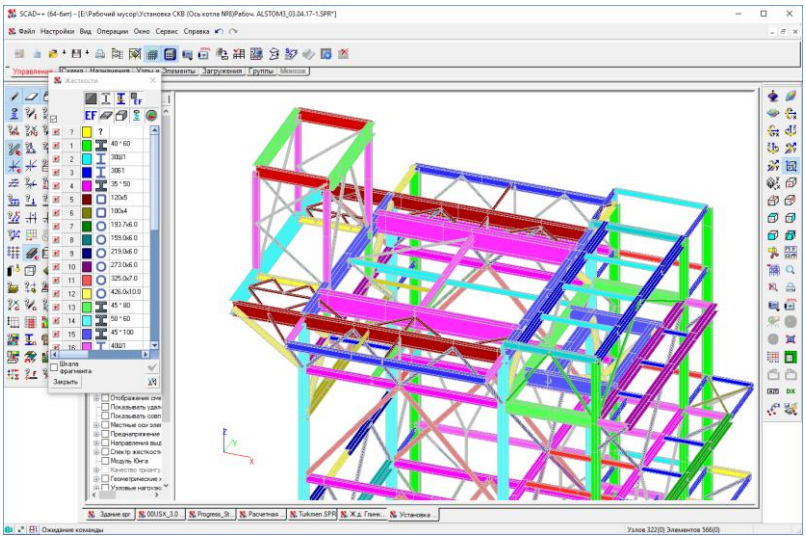


Рис. 10.2-31. *Цветовое отображение типов жесткости с учетом сечений стержней и толщин пластин*

### Спектры жесткостных характеристик



Эта операция позволяет провести сравнительный анализ жесткостных характеристик элементов. Анализ выполняется для стержневых и пластинчатых элементов по следующим параметрам:

- стержни и пластины — модуль упругости, коэффициент Пуассона, объемный вес, параметр затухания;
- стержни — продольная и изгибные жесткости, коэффициенты редуцирования;
- пластины — толщина, цилиндрическая жесткость..., коэффициенты редуцирования.

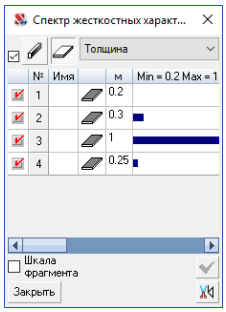



Рис. 10.2-32. *Диалоговое окно* **Спектр жесткостных характеристик**

Выдача спектра жесткостных характеристик выполняется в одноименном диалоговом окне (рис. 10.2-32), в котором можно установить следующие параметры настройки:

- из выпадающего списка выбрать вид анализируемого фактора;
- с помощью маркеров в таблице выбрать только интересующие типы жесткости;
- двойным щелчком левой кнопки мыши по строке соответствующего типа жесткости вызвать диалоговое окно, в котором можно выполнить корректировку жесткостных характеристик.

В графе, отмеченной красным квадратом, указано количество элементов, имеющих соответствующий тип жесткости, а в следующей графе — эта же информация в виде диаграммы.

В остальном работа с этим окном идентична работе с любой другой цветовой шкалой.

### Модуль Юнга



Фильтр позволяет получить цветовую шкалу с величинами модуля упругости в различных конечных элементах расчетной схемы.

### Отображение жестких вставок



Жесткие вставки отображаются на расчетной схеме в масштабе и по заданным для них направлениям. Обратим внимание на то, что при отключенном фильтре отображения жестких вставок на схеме показан не элемент, а линия, соединяющая узлы. Эта линия может не соответствовать действительному положению элемента в схеме. В постпроцессоре в некоторых случаях данный фильтр активируется автоматически. Это происходит, например, при отображении эпюр усилий (поскольку они относятся к гибкой части стержня) или отображении деформированной схемы.

Настройка фильтра отображения жестких вставок выполняется на странице **Жесткие вставки стержней** (рис. 10.2-33). Здесь можно выбрать три способа отображения: описанное выше геометрическое, цветовая шкала (рис. 10.2-34) или одновременно и геометрическое отображение и цветовая шкала.

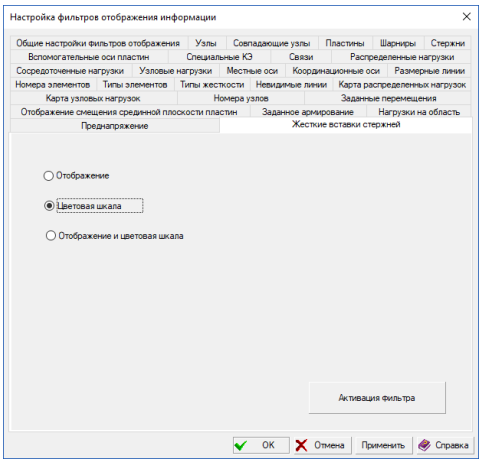



Рис. 10.2-33. *Страница* **Жесткие вставки стержней**

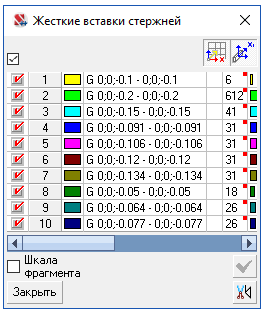



Рис. 10.2-34. *Диалоговое окно* **Жесткие вставки стержней**

### Отображение смещения срединной плоскости пластин



Аналогично жестким вставкам стержней могут быть показаны данные о смещении срединных плоскостей пластин: геометрически, в виде цветовой шкалы или одновременно и геометрическое отображение и цветовая шкала.

### Отображение направления местных осей элементов



Местные оси элементов отображаются в виде цветной тройки осей, расположенной в центре элемента. Кроме того, для пластинчатых элементов предусмотрена возможность окраски элементов в зависимости от направления местной оси $Z_1$. Настройка фильтра выполняется на странице **Местные оси** (рис. 10.2-35).

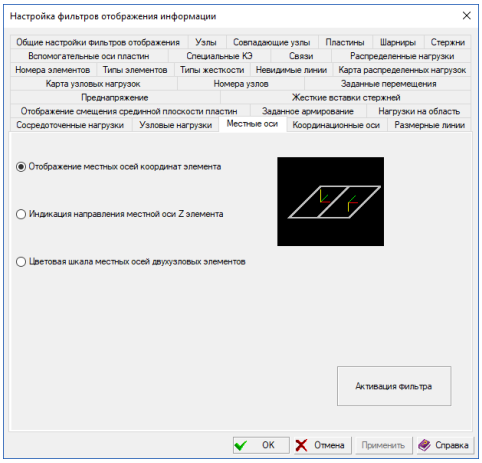



Рис. 10.2-35. *Страница* **Местные оси**

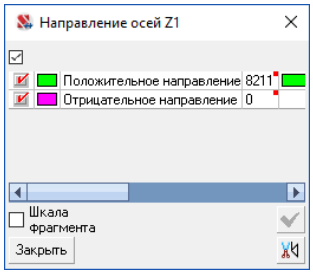



Рис. 10.2-36. *Диалоговое окно* **Направление осей $Z_1$**

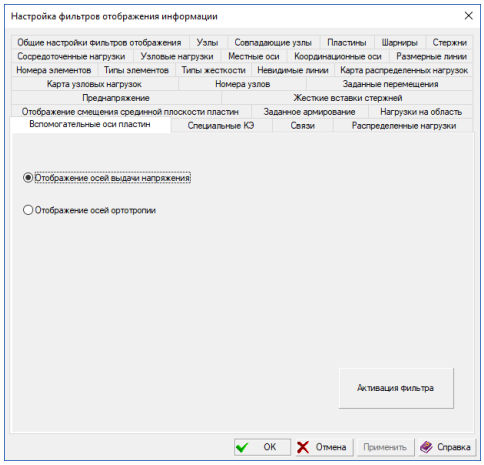
Если активен маркер цветовой маркировки пластин, после активации фильтра появляется диалоговое окно цветовой шкалы **Направление осей $Z_1$** (рис. 10.2-36). С помощью элементов управления этого окна можно выделить фрагмент схемы, включающий только те пластины, у которых местная ось $Z_1$ направлена вверх (положительное направление) или вниз. Для элементов, параллельных плоскости YOZ, положительное направление оси $Z_1$ совпадает с направлением оси X общей системы координат. Для элементов, параллельных плоскости XOZ, положительное направление оси $Z_1$ совпадает с направлением оси Y общей системы координат. Правила работы в этом окне такие же, как и для цветовой шкалы. Следует учесть, что понятия «положительного» и

«отрицательного» направлений условны. Для элементов, расположенных горизонтально, принято, что положительным является направление оси $Z_1$ вверх.

Если активен маркер **Цветовая шкала местных осей двухузловых элементов**, то на расчетной схеме цветами выделяются двухузловые элементы со значениями углов ориентации главных осей инерции, отличными от принятых по умолчанию (заданными пользователем).

### Отображение направлений выдачи напряжений






Этот фильтр используется для отображения направлений выдачи усилий в пластинчатых и объемных элементах. В центре каждого объемного элемента выводятся две стрелки, указывающие направление осей $X_N$ и $Y_N$ выдачи усилий. После активации фильтра в центре каждого пластинчатого элемента выводится стрелка, направление которой совпадает с заданным для него направлением выдачи усилий. Усилия в указанном направлении рассматриваются как направленные вдоль местной оси $X_N$. В исходном состоянии направление стрелок совпадает с направлением местной оси $X_1$ элементов.

Настройка фильтра (рис. 10.2-37) позволяет перейти от отображения направления выдачи усилий к отображению осей ортотропии.

Рис. 10.2-37. *Страница* **Вспомогательные оси пластин**

### Информация об элементе



Режим позволяет получить информацию о типе конечного элемента, количестве сечений выдачи усилий, характеристиках жесткости, приложенных нагрузках, углах ориентации местных осей, шарнирах и жестких вставках. В режиме анализа результатов выдаются эпюры прогибов и усилий, таблицы со значениями расчетных сочетаний усилий и другие результаты. Управление этими операциями сосредоточено в диалоговом окне **Информация об элементе** (рис. 10.2-38).

Для получения информации следует нажать кнопку фильтров и установить в диалоговом окне способ выбора нужного элемента. Для поиска элемента можно внести его номер в поле **Номер элемента** и нажать кнопку **Поиск** или указать на элемент курсором, если предварительно была нажата кнопка **Указание на схеме**.

Выбранный элемент отмечается зеленым кружком, и информация о нем попадает в окно, в котором отображен элемент соответственно его положению в конструкции, его узлы и их номера, а также направления местной системы координат. Узел начала местной системы координат отмечен желтым прямоугольником. Изображение можно вращать с помощью мыши. Двойной щелчок левой кнопки мыши возвращает изображение в первоначальное положение.

В зависимости от типа элемента, заданных данных и выполненных расчетов в диалоговом окне может появляться тот или иной набор кнопок, с помощью которых можно просмотреть соответствующую информацию, а в режиме подготовки данных и изменить. Ниже перечислены основные данные, доступ к которым дает данное окно.

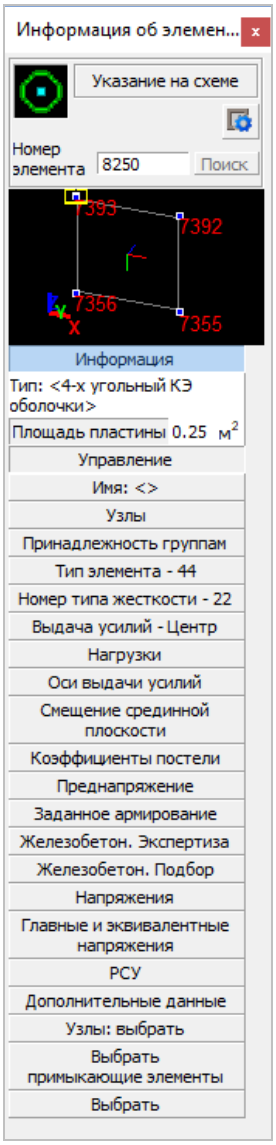



Рис. 10.2-38. *Диалоговое окно* **Информация об элементе**

Кнопка **Узлы** вызывает диалоговое окно **Узлы элемента** (рис. 10.2-39 ), в котором содержится таблица со списком узлов элемента. При подготовке данных можно поменять номера узлов. Если речь идет об элементе с дополнительными узлами на сторонах, то в части таблицы, где перечислены дополнительные узлы, номер узла 0 означает отсутствие дополнительного узла. Меняя 0 на номер существующего узла и наоборот, можно присоединять/отсоединять дополнительные узлы.

**Тип элемента** — здесь указан тип конечного элемента, **Номер типа жесткости** — номер типа жесткости, **Количество сечений** — для стержневых элементов выводится количество промежуточных сечений, в которых вычисляются усилия.

Кнопкой **Нагрузки** вызывается диалоговое окно **Нагрузки на элемент** (рис. 10.2-40) с информацией о нагрузках, приложенных к элементу в каждом загружении. В этом режиме есть возможность выборочного удаления нагрузок из текущего (активного) загружения. Для этого нужно выбрать в списке строку с удаляемой нагрузкой, имеющую признак **Текущее** (загружение), и нажать кнопку **Удалить**.

Величина выбранной в списке нагрузки выводится в одноименное информационное окно. Для корректировки величины нагрузки следует отметить ее в списке, изменить значения в полях ввода и нажать кнопку **Изменить**. Факт удаления или изменения величины нагрузки будет зафиксирован только в том случае, если загружение сохранить — воспользоваться кнопкой  в разделе **Загружения**.

Кнопкой **Номер типа жесткости** вызывается диалоговое окно с жесткостными характеристиками элемента, которые могут быть откорректированы. Главное, что нужно помнить при использовании этой операции, — изменены будут только характеристики анализируемого элемента, что соответствует созданию нового типа жесткости.

Если требуется изменить характеристики определенного типа жесткости, эту операцию следует выполнить, вызвав соответствующую операцию из раздела **Назначения** или используя цветовую индикацию номеров типов жесткости (рис. 10.2-29).

Для двухузловых элементов кнопкой **Местные оси** вызывается диалоговое окно **Ориентация осей инерции**, кнопкой **Шарниры** — окно **Условия примыкания стержневых элементов**, а кнопкой **Жесткие вставки** — одноименное диалоговое окно, в которых можно откорректировать ранее заданные параметры. Для выбранного элемента при подготовке данных можно соответствующими кнопками изменить **Коэффициенты упругого основания** и **Преднапряжение**. При необходимости анализируемый элемент может быть удален или маркирован как выбранный. Для выполнения этих операций используются кнопки **Удалить элемент** и **Выбрать**, соответственно.

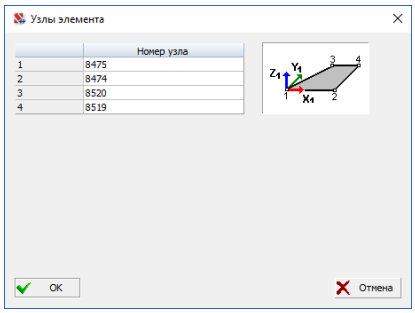



Рис. 10.2-39. *Диалоговое окно* **Узлы элемента**

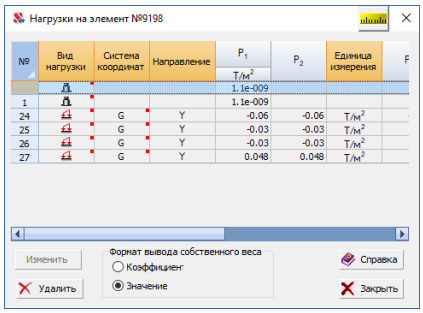



Рис. 10.2-40. *Диалоговое окно* **Нагрузки на элемент**

Нажатие кнопки **Выбрать примыкающие элементы** приводит к тому, что данный элемент и все элементы, имеющие с ним общие узлы, становятся селектированными.

Следует напомнить, что модификация характеристик элементов доступна только в препроцессоре. Обращение к описанным выше функциям в режиме анализа результатов носит чисто информационный характер.

В режиме анализа результатов расчета для стержневых элементов могут быть построены эпюры прогибов (в местной системе координат) или усилий. Вызов окон с отображением эпюр (рис. 10.2-41 и 10.2-42) выполняется одноименными кнопками. Полученные эпюры можно вывести в отчетный документ, нажав кнопку **Отчет**, или загрузить в приложение Excel® таблицы со значениями факторов, на основе которых строились эпюры.

Если анализируется прямое интегрирование уравнений движения (глава 15), то появляется возможность просмотра графиков изменения компонент усилий (напряжений) во времени.

Кнопка **Напряжения в сечениях** позволяет для стержней анализировать для текущего загружения (или комбинации загружений) распределение нормальных, касательных или эквивалентных (по теории Мизеса) напряжений в сечениях стержневых элементов (рис. 10.2-45). Для пластинчатых и объемных элементов кнопка **Напряжения** активирует диалоговое окно с таблицей напряжений (рис. 10.2-43). Аналогично, кнопка **Главные и эквивалентные напряжения** позволяет получить таблицу с одноименной информацией (рис. 10.2-44).

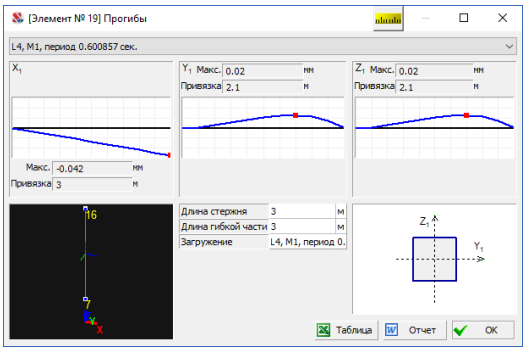



Рис. 10.2-41. *Эпюры перемещений (прогибов)*

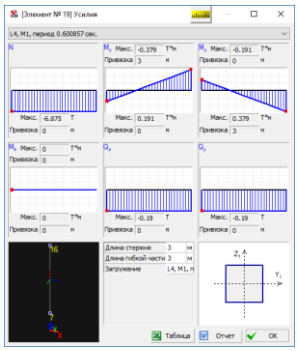


Рис. 10.2-42. *Эпюры усилий*

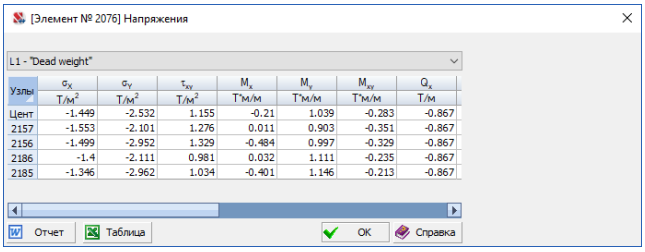



Рис. 10.2-43. *Диалоговое окно* **Напряжения**

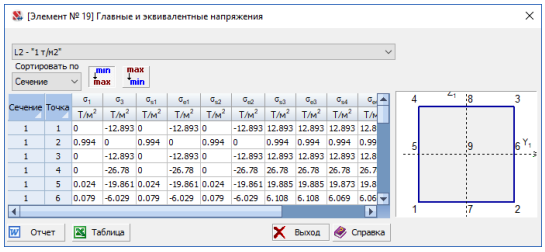



Рис. 10.2-44. *Диалоговое окно* **Главные и эквивалентные напряжения**

С помощью кнопки **Принадлежность группам** вызывается диалоговое окно (рис. 10.2-46), в котором приводится список групп, содержащих данный элемент. Маркер **Показывать все группы** позволяет расширить список и получить полный набор групп. В каждой строке этого списка соответствующий маркер показывает факт принадлежности элемента группе. Меняя эти маркера можно удалить выбранный элемент из группы или добавить его в группу. Колонка *Тип группы* показывает, является ли группа общей или группой конструктивных элементов (стальных или железобетонных). Для конструктивных групп кнопка **Просмотреть** позволяет увидеть данные группы.

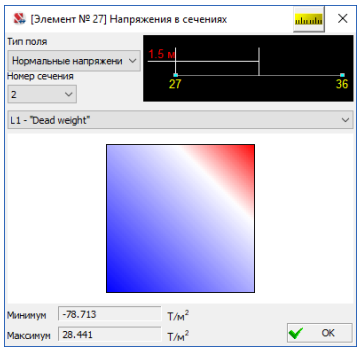



Рис. 10.2-45. *Диалоговое окно* **Напряжения в сечениях**

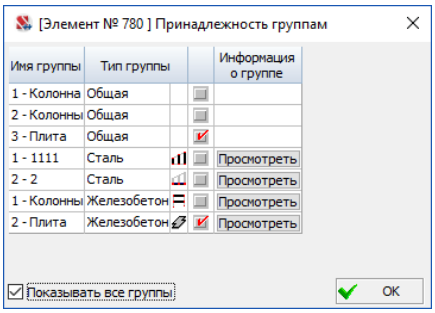



Рис. 10.2-46. *Диалоговое окно* **Принадлежность группам**

Если выполнено формирование расчетных сочетаний усилий, то, воспользовавшись кнопкой **РСУ**, можно получить в табличном виде информацию о расчетных сочетаниях усилий в выбранном элементе в специальном диалоговом окне (подробнее см. раздел 18.12). В аналогичном окне (вызывается кнопкой **РС прогибов**) представлена информация о расчетных сочетаниях прогибов в стержневых элементах.

При выполнении расчета на прогрессирующее разрушение, становится доступна кнопка **РСУ (прогрессирующее обрушение)** и таблицы будут включать данные, соответствующие правилам этого расчета (см. главу 24). Кроме того, в этом случае по кнопке **Прогрессирующее обрушение** можно получить информацию о коэффициентах использования ограничений исследуемого элемента.

Если элемент принадлежит группе конструктивных стальных или железобетонных элементов, то для него появятся кнопки, позволяющие получить информацию о результатах подбора арматуры или экспертизы по нормам расчета железобетонных или стальных конструкций. Более детально это описано в главах 19, 20.

Диалоговое окно **Информация об элементе** может занимать любое место в рабочем поле или размещаться вне его. Его можно не закрывать при выполнении операций назначения или корректировки геометрии схемы.

В тех случаях, когда набор кнопок или информация, предусмотренные по умолчанию в диалоговом окне **Информация об элементе**, включают не используемые или редко используемые позиции, предусмотрена возможность отказаться от них, т.е настроить диалоговое окно на отображение только необходимых данных. Для этого используется операция **Настройки**, которая вызывается нажатием одноименной кнопки  в рассматриваемом окне или нажатием правой кнопки мыши. В результате активации операции появляется меню, с помощью которого можно как отказаться от появление тех или иных позиций, так и восстановить ранее исключенные из окна. Выполненные настройки будут использоваться в дальнейшем при работе во всех окнах и со всеми моделями. Если пользователь изменил настройку, то кнопка **Настройки** будет иметь дополнительный индикатор  , свидетельствующий об изменении стандартных настроек.

## Отображение нагрузок, масс и заданных смещений

Этот раздел посвящен рассмотрению вопроса отображения нагрузок в программе **SCAD**.

### Отображение узловых нагрузок



Правила отображения нагрузок этого типа назначаются на странице (рис. 10.2-47) **Узловые нагрузки**. Элементы управления этой страницы позволяют выбрать нагрузки по виду (силы, моменты) и направлению действия для текущего загружения. Если в списке **Величина нагрузки** отметить строки со значениями нагрузок, то на схеме будут показаны только те нагрузки, величина которых совпадает с отмеченными значениями (если они заданы в текущем, т. е. активном загружении).

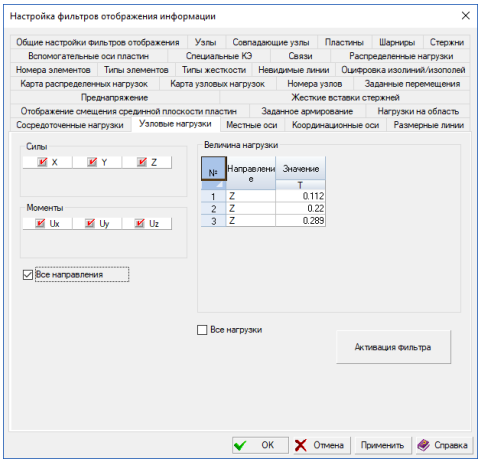



Рис. 10.2-47. *Страница* **Узловые нагрузки**

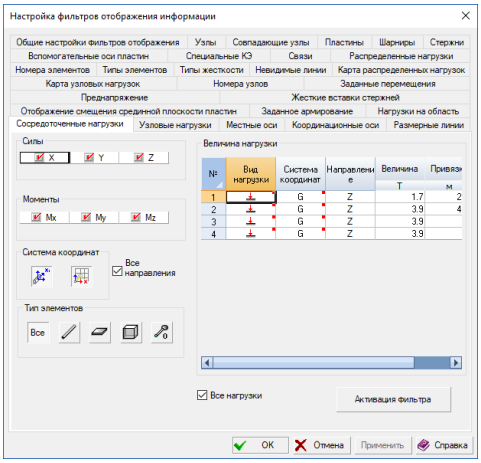



Рис. 10.2-48. *Страница* **Сосредоточенные нагрузки**

Узловые нагрузки отображаются следующим образом:

- силы — в виде стрелки вдоль соответствующей оси;
- моменты — в виде двойной стрелки вдоль оси, вокруг которой действует момент.

В обоих случаях направление стрелок определяется знаком силы или момента.

По умолчанию силы отображаются красными, а моменты — зелеными стрелками.



**Напомним, что сила положительна, если она направлена против направления оси, а момент — если его вектор, определенный по правилу правого винта, действует против направления оси.**

### Отображение местных сосредоточенных нагрузок



Правила отображения нагрузок назначаются на странице **Сосредоточенные нагрузки** (рис. 10.2-48). Элементы управления этой страницы позволяют выбрать для отображения в загружении нагрузок по их виду (силы, моменты), направлению действия, типу элементов и системе координат, в которых они приложены (местная, общая).

Кроме того, на странице расположен список значений нагрузок, аналогичный странице **Узловые нагрузки**. Сосредоточенные нагрузки отображаются следующим образом:

- силы — в виде стрелки вдоль соответствующей оси;
- моменты — в виде двойной стрелки вдоль оси, вокруг которой действует момент.

Правило знаков совпадает с описанным для узловых нагрузок, но с учетом системы координат (местной или общей).

### Отображение местных распределенных нагрузок



Для назначения правил отображения нагрузок этого типа используется страница **Распределенные нагрузки** (рис. 10.2-49). Элементы управления этой страницы позволяют выбрать

нагрузки по их виду (силы или моменты), направлению действия, типу элементов и системе координат, в которых они приложены (местная, общая). Кроме того, на странице расположен список значений нагрузок, аналогичный странице **Узловые нагрузки**.

На стержневых элементах **равномерно распределенные** нагрузки отображаются следующим образом:

- силы — в виде связанной пары стрелок, приложенных к узлам элемента вдоль соответствующей оси;
- моменты — в виде связанной пары двойных стрелок, приложенных к узлам элемента вдоль соответствующей оси, вокруг которой действует момент.

На пластинчатых элементах нагрузки отображаются следующим образом:

- силы — в виде связанной тройки или четверки (в зависимости от количества узлов в элементе) стрелок, приложенных к узлам элемента вдоль соответствующей оси;
- моменты — в виде связанной тройки или четверки двойных стрелок, приложенных к узлам элемента вдоль соответствующей оси, вокруг которой действует момент.

На объемных элементах равномерно-распределенные нагрузки отображаются в виде стрелки, приложенной к центру элемента и направленной вдоль соответствующей оси.

**Трапециевидные** нагрузки на стержневых элементах отображаются следующим образом:

- силы — в виде связанной пары стрелок, приложенных к элементу вдоль соответствующей оси;
- моменты — в виде связанной пары двойных стрелок, приложенных к элементу вдоль соответствующей оси, вокруг которой действует момент.

Для пластинчатых элементов принята следующая система обозначений:

- силы — в виде связанной тройки или четверки (в зависимости от количества узлов в элементе) стрелок, приложенных к узлам элемента вдоль соответствующей оси;
- моменты — в виде связанной тройки или четверки двойных стрелок, приложенных к узлам элемента вдоль соответствующей оси, вокруг которой действует момент.

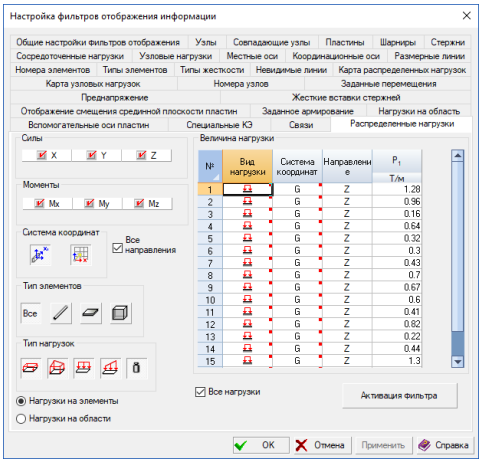



Рис. 10.2-49. *Страница* **Распределенные нагрузки**

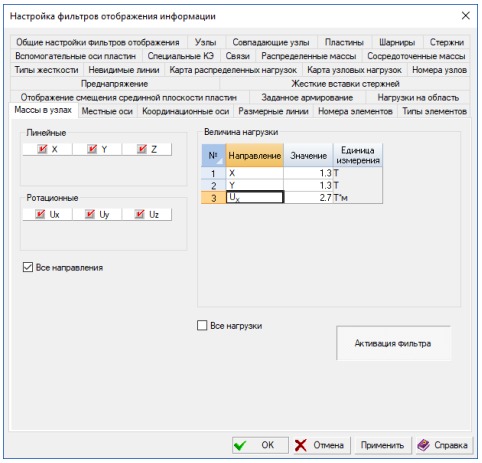



Рис. 10.2-50. *Страница* **Массы в узлах**

На странице **Распределенные нагрузки** предусмотрено переключение в режим, при котором можно задать фильтры отображения нагрузок на области, выбрав вид, направление или конкретный набор нагрузок.

По умолчанию силы отображаются одинарными красными, а моменты — двойными зелеными стрелками. Правило знаков совпадает с описанным для узловых нагрузок с учетом системы координат (местной или общей), в которой приложены нагрузки.

### Отображение температурных нагрузок



Температурные нагрузки отображаются волнистыми стрелками, приложенными к центрам элементов, для которых задан этот вид нагрузки.

Настройка отображения этого вида нагрузок не предусмотрена.

### Отображение масс и динамических воздействий



Если активным является динамическое загружение, то пиктограммы отображения узловых, сосредоточенных и распределенных нагрузок меняются, пользователь получает возможность графического отображения масс.

Для управления отображением масс и динамических воздействий используются страницы аналогичные страницам настройки отображения нагрузок (см. рис. 10.2-49). Возможности управления выводом во многом повторяют описанные выше для узловых нагрузок.

Массы отображаются на схеме в виде линий без стрелок (не имеют знака) вдоль соответствующей оси.

### Отображение заданных перемещений



Этот фильтр служит для отображения нагрузок, заданных как смещение связи (расчет на заданные перемещения). Аналогично узловым нагрузкам для нагрузок данного типа предусмотрена настройка, позволяющая выбрать направления действия или отдельные значения, которые подлежат визуализации. Значение заданного перемещения можно вывести на экран, используя кнопку фильтров **Значения нагрузок** —  .

### Построение карты распределенных нагрузок



Операция построения карты распределенных нагрузок используется для контроля суммарных равномерно распределенных нагрузок, заданных в текущем загружении. В результате выполнения этой операции элементы расчетной схемы окрашиваются в различные цвета в зависимости от значения суммарной нагрузки.

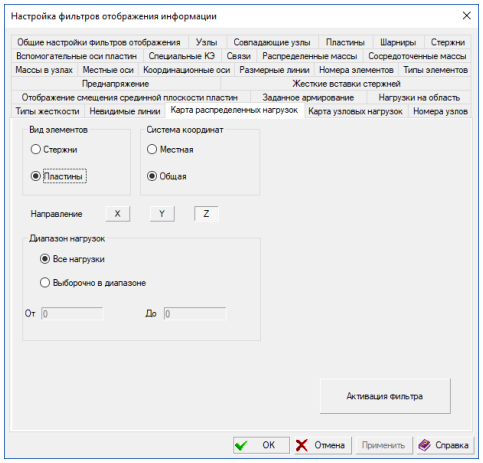



Рис. 10.2-51. *Страница* **Карта распределенных нагрузок**

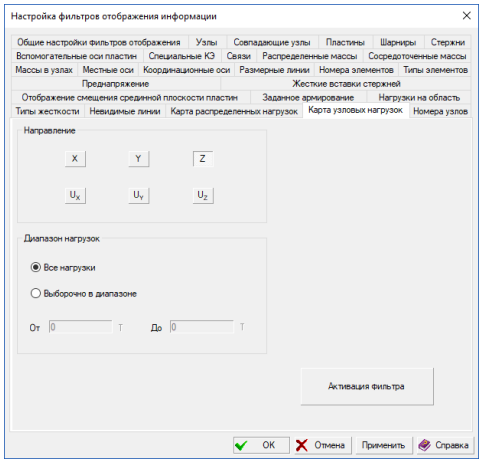



Рис. 10.2-52. *Страница* **Карта узловых нагрузок**

Настройка выполняется на странице (рис. 10.2-51) **Карта распределенных нагрузок,** которое вызывается при настройке фильтра и имеет следующие параметры:

- **Вид элементов** — стержни или пластины;
- **Система координат** задания нагрузок — местная или общая;
- **Направление** действия нагрузки — X, Y или Z;
- **Диапазон нагрузок** — все нагрузки или попавшие в заданный диапазон (в последнем случае следует задать диапазон, в котором лежат значения нагрузок).

Значения суммарных нагрузок могут быть выведены в центрах элементов с помощью кнопки фильтров **Значения нагрузок** —  .

### Карта узловых нагрузок



Операция построения карты узловых нагрузок используется для контроля суммарных узловых нагрузок, заданных в текущем загружении. В результате выполнения этой операции узлы расчетной схемы помечаются цветовыми маркерами в зависимости от значения суммарной нагрузки.

Настройка выполняется на странице **Карта узловых нагрузок** (рис. 10.2-52), которое вызывается при настройке фильтра и имеет следующие параметры:

- **Направление** действия нагрузки — X, Y, Z, $U_X$, $U_Y$, $U_Z$;
- **Диапазон нагрузок** — все нагрузки или попавшие в заданный диапазон (в последнем случае следует задать диапазон, в котором лежат значения нагрузок).

Значения суммарных нагрузок могут быть выведены с помощью кнопки фильтров **Значения нагрузок** —  .

### Индикация количества нагрузок



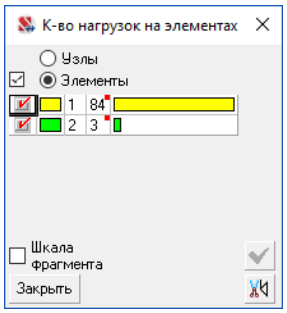



Рис. 10.2-53. *Цветовая шкала* **Индикация количества нагрузок**

Этот фильтр служит для отображения цветовой карты количества нагрузок на элементы/узлы. Каждый элемент/узел схемы или фрагмента будет окрашен в свой цвет в зависимости от количества приложенных к нему в данном загружении нагрузок. Стандартная (рис. 10.2-53) цветовая шкала позволяет выбрать объекты для отображения (узлы или элементы) и управлять отображением, включая выделение элементов/узлов во фрагмент в зависимости от количества нагрузок.

### Вывод значений нагрузок и масс



Значения нагрузок выводятся по следующим правилам:

- для узловых и сосредоточенных нагрузок — рядом со стрелкой, отображающей нагрузку;
- для равномерно распределенных нагрузок на стержнях — в центре области, ограниченной парой стрелок;
- для равномерно распределенных нагрузок на пластинах и объемных элементах — в центре элемента;
- для трапециевидных нагрузок — значения нагрузки рядом со стрелками;
- для масс — аналогично узловым нагрузкам (перед значением массы стоит буква M);
- для динамических воздействий (импульс, удар, гармоника) при выводе нагрузок используются префиксы IM, SM, HM соответственно.

Вид, цвет и размер шрифта для указания величины нагрузки могут быть изменены на странице **Установка шрифтов** диалогового окна **Параметры**, вызываемого из раздела меню ***Настройки***.

При выводе нагрузок их изображение масштабируется в соответствии с величиной нагрузки. Масштабирование выполняется отдельно для сил и моментов.

## Отображение осей общей системы координат



При работе с моделью отображение общей системы координат постоянно находится в нижнем левом углу окна и показывает текущее положение (поворот) расчетной схемы. После активации фильтра отображение системы координат переносится в точку с координатами 0, 0, 0.

Настройка этого фильтра не предусмотрена.

## Отображение координационных осей



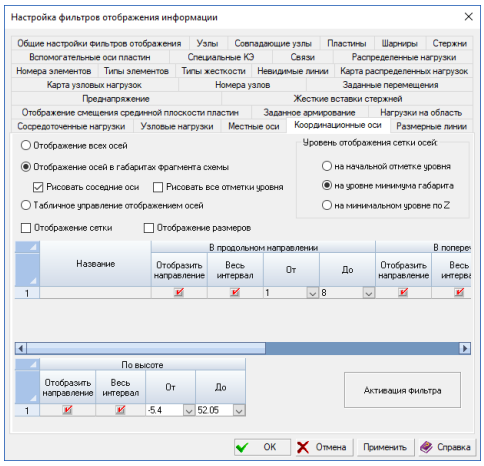



Рис. 10.2-54. *Страница* **Координационные оси**

Операция используется для отображения на схеме заданных координационных (разбивочных) осей и отметок уровней. Управление отображением осей выполняется на странице настройки фильтров **Координационные оси** (рис. 10.2-54). С помощью элементов управления этого окна можно выполнить следующие действия:

- установить режим отображения всех или отдельных групп осей и отметок, целиком или только в указанном интервале по каждому направлению;
- выбрать правила отображения марок осей;
- назначить отображение осей только в габаритах фрагмента схемы;
- включить режим **Отображение сетки**;
- вывести размерные линии.

Для управления выборочной отрисовкой осей по каждому направлению следует включить маркер **Табличное управление отображением осей**, после чего выполнить необходимые настройки в таблицах.

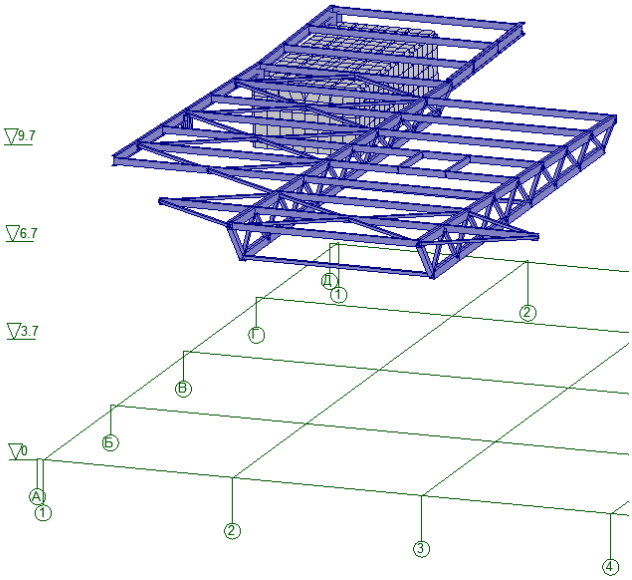
Маркеры в графе **Отобразить направление** разрешают или запрещают вывод осей в продольном или поперечном направлениях, а также отметок. Если отключить маркер **Весь интервал**, то появится возможность указать марки осей, которые определяют интервал, отображаемый на экране. В этом случае открывается доступ к спискам **От** и **До**, в первом из которых выбирается марка (отметка) первой оси интервала, а во втором списке — последней. Данное выборочное отображение может быть заказано для каждой группы осей.

Разбивочные оси можно показать вместе с размерными линиями. Для этого следует активировать маркер **Отображение размеров**.

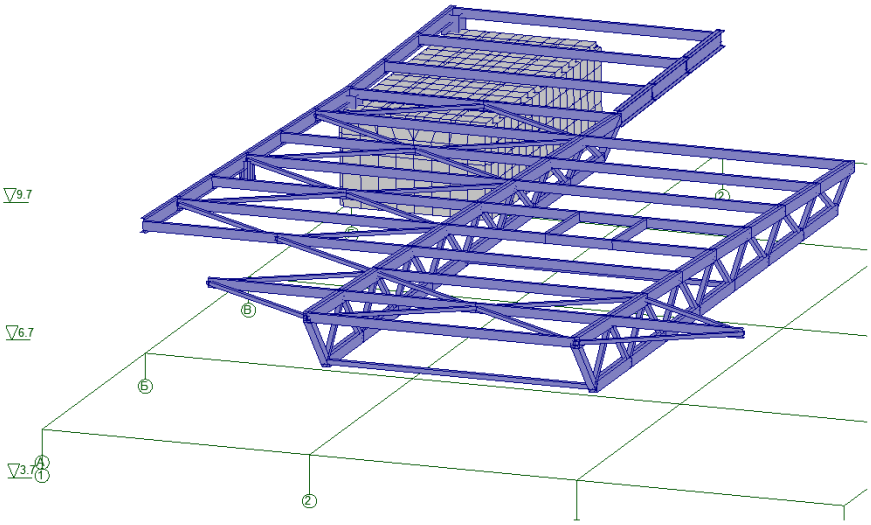
По умолчанию отметки уровня рисуются на вертикальной прямой, которая пересекает горизонтальную плоскость в начале выбранной пользователем системы осей. Если эта система при помощи настроек в таблице исключена из отображения, то высотные отметки отображаются в начале габарита модели.

Для выбора горизонтальной плоскости, в которой рисуются координационные оси, программа предоставляет возможность выбора одного из следующих вариантов

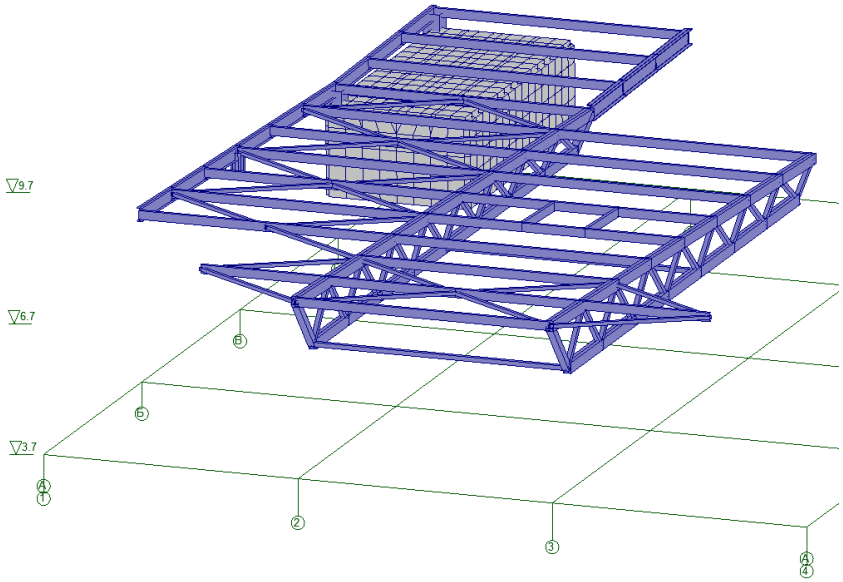
На начальной отметке уровня



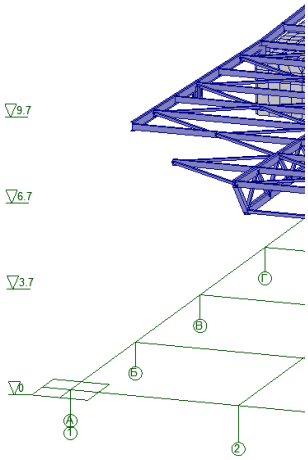

На уровне минимума габарита фрагмента (в частном случае — минимума габарита всей расчетной схемы)



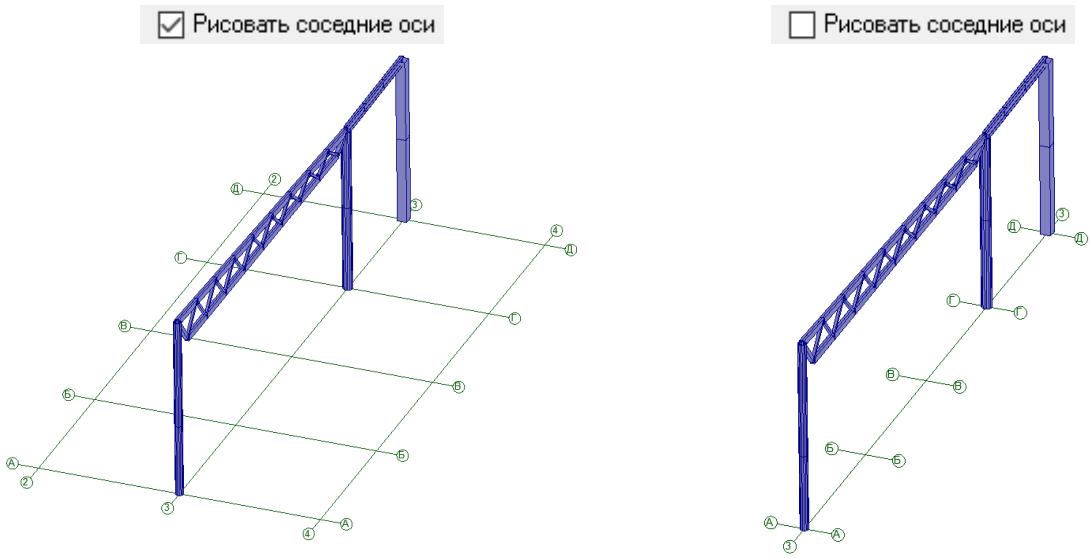
На уровне той отметки уровня, которая имеет минимальную координату Z.




Если заказано отображение осей в габаритах фрагмента схемы, то маркер **Рисовать все отметки уровня** позволяет получить изображение, на котором легче понять, на какой высоте расположен выбранный фрагмент.




По умолчанию при отображении координационных осей в габаритах фрагмента схемы отображаются все оси, которые пересекают фрагмент, а также соседние оси. Это позволяет однозначно определить положение фрагмента. Для наиболее распространенного случая, когда задана только одна система прямоугольных осей (или отображение всех остальных осей отключено при помощи таблицы), предусмотрена дополнительная возможность управления отображением осей — отключение маркера **Рисовать соседние оси** приводит к тому, что отображаются только те оси, которые пересекают фрагмент.




## Отображение размерных линий



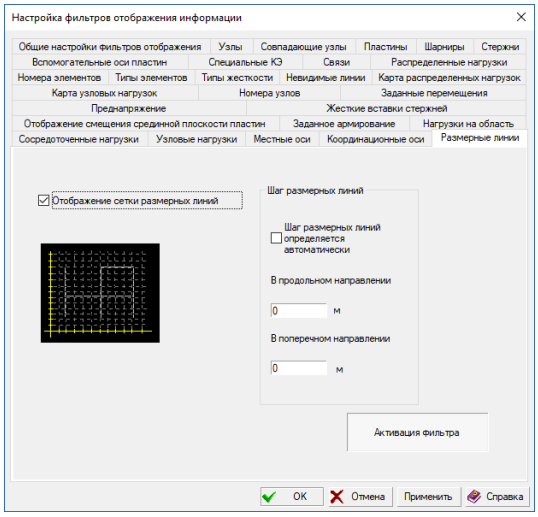



Рис. 10.2-55. *Страница* **Размерные линии**

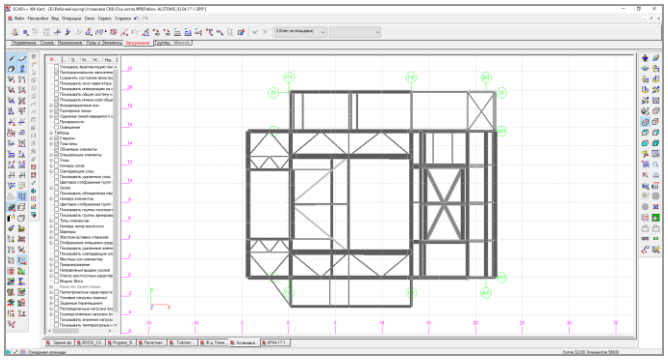


Рис. 10.2-56. *Вывод размерных линий и сетки*

Эта операция позволяет вывести на экран линейки с размерными линиями. Они устанавливаются по нижней и левой кромкам рабочего окна. Настройка фильтра выполняется на странице **Размерные линии** (рис. 10.2-55) и позволяет активировать отображение сетки. Размерные линии и сетка выводятся только в том случае, если фрагмент или вся схема спроецированы на одну из плоскостей общей системы координат (рис. 10.2-56).

Шаг размерных линий может быть выбран автоматически или назначен пользователем.

## Удаление линий невидимого контура



На странице настройки фильтров отображения **Невидимые линии** (рис. 10.2-57) можно установить следующие режимы отображения расчетной схемы:

- удаление линий невидимого контура или контурное отображение;
- то же с объемным отображением профиля стержневых элементов;

- то же с отображением толщины пластин.
  При активации этой операции следует учитывать, что:
- при использовании режима отображения GDI время удаления линий невидимого контура зависит от размеров расчетной схемы и для больших систем может оказаться весьма значительным. Значительно увеличивается время удаления при активных опциях отображения профилей стержневых элементов и толщин пластин;
- в диалоговом окне **Настройка параметров среды** есть возможность установить разрыв между стержневыми элементами (группа кнопок **Отступы при отображении профилей** на рис. 10.4-1). Разрыв необходим для корректного определения факта пересечения элементов при объемном отображении профилей;
- разрыв определяет расстояние от конца стержня до узла в долях от размеров сечения; если разрыв задан нулевым, то пересечение стержней, приходящих в один узел, непредсказуемо, и время удаления может увеличиться в несколько раз;
- для коротких стержней, чья длина соизмерима с размером их поперечного сечения, в режиме GDI вывод профилей не выполняется.

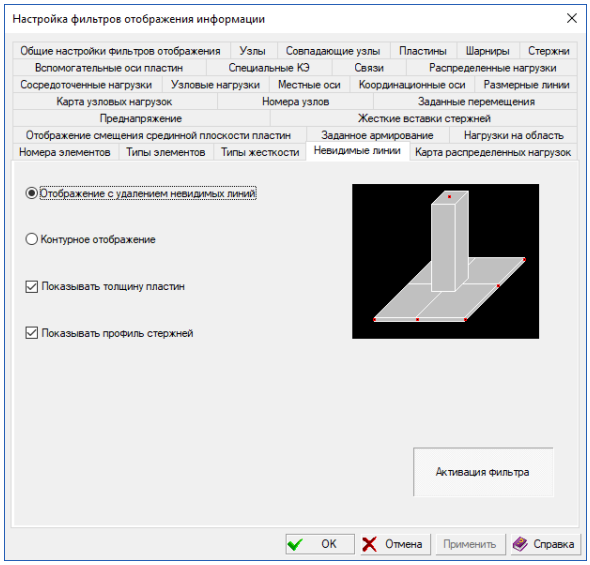
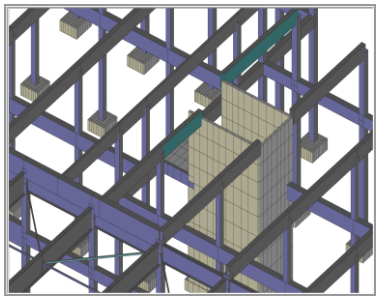
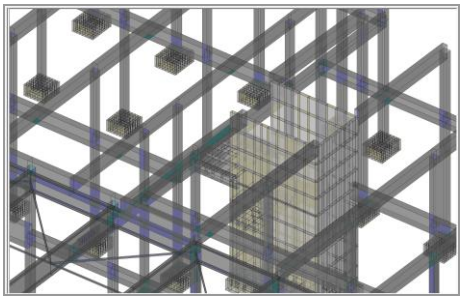



Рис. 10.2-57. *Страница* **Невидимые линии**

*а*)



*б*)



*в*)

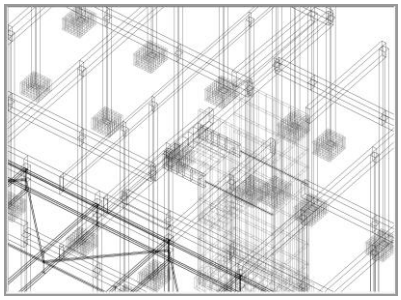


Рис. 10.2-58. *Отображение профилей стержневых элементов и пластин*
*а) с включенной опцией* **Отображение с удалением невидимых линий**;
*б) с включенным фильтром* **Прозрачность**; *в) с включенной опцией* **Контурное изображение**

### Прозрачность, освещенность, перспектива



Эти три кнопки панели фильтров позволяют получить изображение с эффектами прозрачности, освещенности и перспективы соответственно. Все три опции доступны только в том случае, если отображение выполняется в режиме DirectX.

## Цветовая индикация групп узлов и элементов



Активация этих фильтров вызывает соответствующую цветовую шкалу (рис. 10.2-59), в которой каждой группе узлов или элементов соответствует свой цвет и строка с наименованием группы. Соответственно, узлы и элементы схемы, принадлежащие этим группам, выделяются цветом. При работе с цветовыми шкалами доступны следующие операции:

- выделение во фрагмент **активных** групп (группы узлов могут включаться во фрагмент без элементов или с примыкающими к ним элементами);
- удаление активных групп.

Активными считаются группы, у которых активен маркер. С узлами и элементами групп, попавшими во фрагмент, могут выполняться любые операции корректировки, назначения и визуализации. Эти группы могут быть записаны в качестве самостоятельных схем (кнопка  в разделе **Управление**).

Чтобы получить новый фрагмент, состоящий из других групп, следует переустановить маркеры активации групп и нажать кнопку **Фрагментировать**.

Вернуться к отображению полной схемы можно, выполнив фрагментацию при активном состоянии всех групп в цветовой шкале или нажав кнопку **Исходное отображение схемы**  фильтров визуализации.

*а*) *б*)

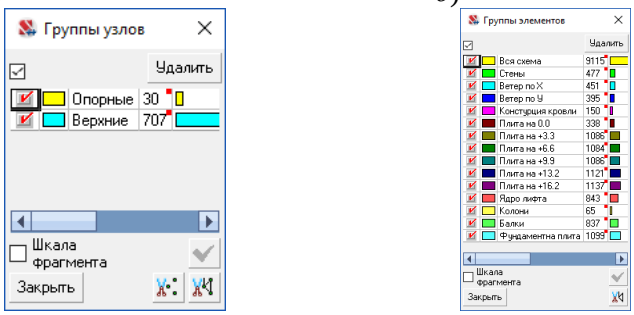



Рис. 10.2-59. *Цветовые шкалы*
*а*) **Группы узлов**; *б)* **Группы элементов**

**Следует помнить, что цветовая индикация групп не будет работать одновременно с другими режимами отображения, предполагающими окраску элементов/узлов.**

В постпроцессоре при цветовой индикации групп элементов кнопка  позволяет получить оцифровку элементов номерами групп, которым принадлежит тот или иной элемент.

## Цветовое отображение заданного армирования



Фильтр используется для цветовой индикации элементов с различными типами заданного армирования. Цветовая шкала (рис. 10.2-60) содержит переключатели  ,  , с помощью которых можно получить цветовые шкалы для пластин или стержней соответственно.

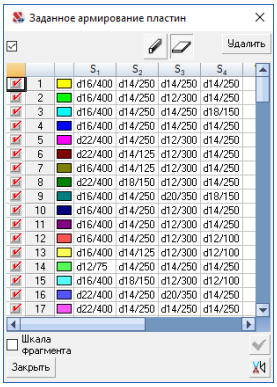



Рис. 10.2-60. *Цветовая шкала*
**Заданное армирование пластин**

## Отображение групп конструктивных элементов



Эти фильтры используются для цветовой индикации групп конструктивных элементов для проверки и подбора сечений металлопроката —  или групп железобетонных элементов —  . Цветовая шкала (рис. 10.2-61) включает имена групп, маркеры и кнопки **Применить** и **Фрагментировать**, выполняющие те же функции, что и аналогичные элементы управления цветовой индикации групп элементов.

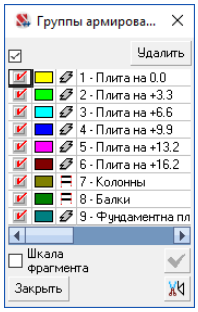



Рис. 10.2-61. *Цветовая шкала*
**Группы армирования**

Условные обозначения, стоящие за цветовым маркером, в конструктивных группах элементов железобетонных конструкций обозначают:

 — группа пластинчатых конструктивных элементов;

 — группа стержневых конструктивных элементов;

 — стержневой конструктивный элемент.

Для конструктивных групп элементов стальных конструкций приняты следующие обозначения:

 — группа конструктивных элементов;

 — конструктивный элемент.

Если конструктивная группа имеет признак дополнительной, то указанные выше пиктограммы отображаются на зеленом фоне. В графах, следующих за именем группы, указано количество элементов, входящих в группу, и отображение их количества в виде диаграммы.

В постпроцессоре при цветовой индикации групп конструктивных элементов кнопка  позволяет получить оцифровку элементов номерами групп, которым принадлежит тот или иной элемент.

### Отмена выбора узлов и элементов



Формально эта операция не относится к фильтрам отображения, но она достаточно часто может использоваться при работе со схемой и по этой причине попала на инструментальную панель фильтров. После нажатия этой кнопки будет снята селекция со всех выбранных или маркированных элементов и узлов.

### Навигатор



Навигатор позволяет определить положение видимой части расчетной схемы после выполнения операций фрагментации рамкой и отсечения на проекциях. После активации навигатора появляется окно с изображением расчетной схемы, в котором ее видимая часть рисуется красным цветом.

### Показать элементы, включенные/не включенные на указанной стадии монтажа



Позволяет увидеть элементы, работающие на стадии монтажа (см. главу 14). На странице **Стадии монтажа** окна **Настройка фильтров отображения** можно активировать отображение на схеме информации о коэффициентах изменения модуля упругости или активировать цветовое отображение стадий монтажа (элементу присваивается тот или иной цвет в соответствии с той стадией, на которой данный элемент впервые появился).

### Преднапряжение



Если в расчетной схеме есть элементы с преднапряжением, то используя данный фильтр, можно получить цветовую шкалу (рис. 10.2-62), отображающую величины преднапряжений и/или нанесенные на элементы величины преднапряжений.

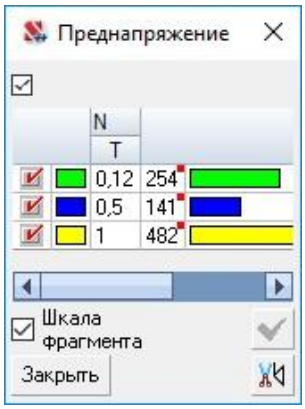



Рис. 10.2-62. *Цветовая шкала* **Преднапряжение**

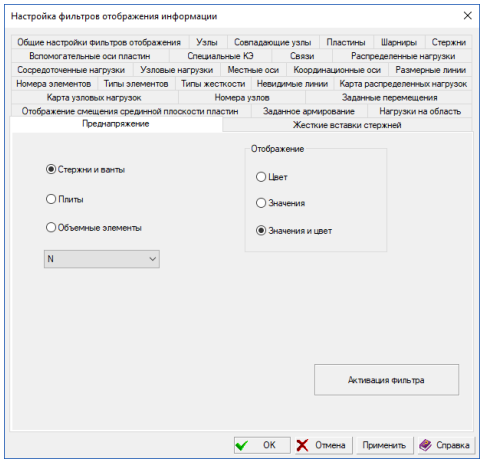



Рис. 10.2-63. *Страница* **Преднапряжение**

Настройки фильтра (рис. 10.2-63) позволяют выбрать вид элементов пластины, стержни/ванты или объемные элементы, указать интересующий силовой фактор, а также выбрать стиль отображения: цвет и/или оцифровка.

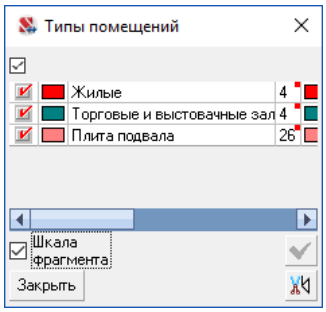
### Цветовое отображение блоков



Для моделей типа **ФОРУМ** активация данной опции приводит к тому, что для каждого блока все элементы, принадлежащие этому блоку, будут окрашены в цвет, который "присвоен" блоку.

### Типы помещений






Для моделей типа **ФОРУМ**, в которых задана информация о типах помещений можно получить цветовую шкалу (рис. 10.2-64) и раскраску перекрытий в различные цвета в зависимости от присвоенного им типа помещения.

Рис. 10.2-64. *Цветовая шкала* **Типы помещений**

### Цветовое отображение групп огнестойкости



Этот фильтр используется для цветовой индикации групп огнестойкости. Цветовая шкала включает имена групп, маркеры и кнопки **Применить** и **Фрагментировать**, выполняющие те же функции, что и аналогичные элементы управления цветовой индикации групп элементов.

## 10.3. Отображение результатов расчета

В разделе описываются средства визуализации результатов расчета (деформации, усилия, напряжения).

### Панель Визуализация результатов

Панель доступна в режиме анализа результатов расчета и включает элементы управления для настройки изображения при выводе изополей и изолиний, вывода на схему значений исследуемого фактора, а также визуализации прогибов стержневых элементов (рис. 0-1).




Рис. 10.3-1. *Панель* **Визуализация результатов**

### Отображение прогибов в стержнях



В режиме графического анализа результатов расчета с помощью этого фильтра можно получить отображение деформированной схемы с учетом перемещений в промежуточных точках

стержня. Фильтр может быть включен в режиме анимации или формирования видеоклипов (AVI-файлов).

Следует учитывать, что при включенном режиме отображения прогибов время формирования деформированной схемы несколько увеличивается.

### Сетка конечных элементов на изополях



Данную опцию следует активировать, если одновременно с отображением изополей/изолиний нужно отобразить сетку конечных элементов (см. рис. 10.3-2).

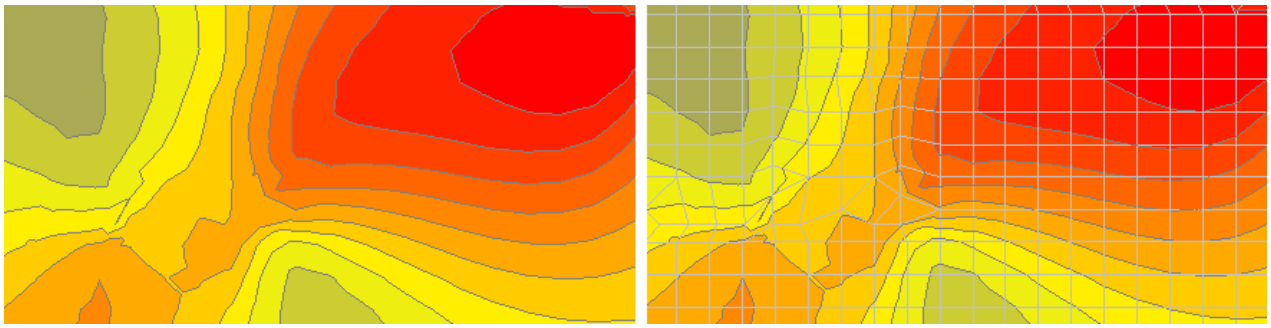


Рис. 10.3-2. *Изополя без сетки конечных элементов и с сеткой*

### Отображение деформированной схемы



Фильтр  позволяет получить изображение деформированной схемы. Если использован фильтр  , то на экране появятся деформированная и недеформированная схемы. При отрисовке деформированной схемы можно использовать коэффициент масштабирования перемещений. Для этого следует нажать кнопку **Коэффициент масштабирования перемещений**  и выбрать в появившемся меню нужный коэффициент масштабирования.

### Вывод значений на изолиниях, изополях и эпюрах



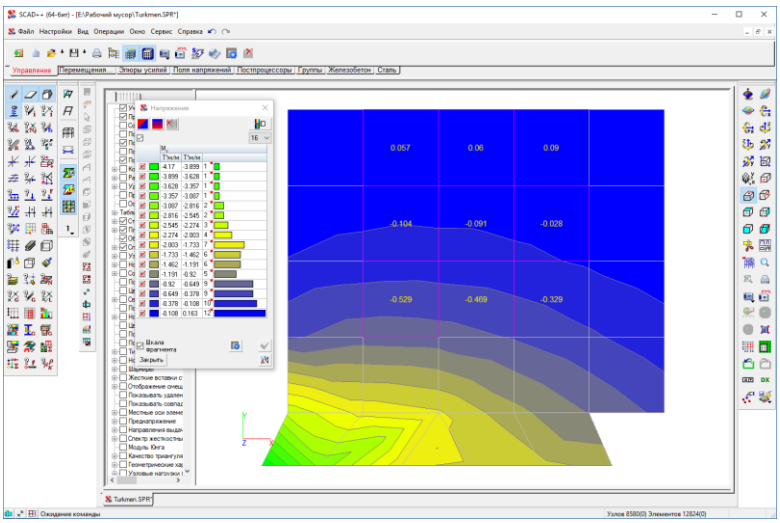


Рис. 10.3-3. *Пример оцифровки части изополей*

Этот фильтр доступен в режиме графического анализа результатов и работает только «поверх» цветового отображения исследуемого фактора (изолинии, изополя и т. п.) или эпюр. Он позволяет вывести полученные в результате расчета значения в центрах элементов и/или узлах.

Для того чтобы отобразить на схеме только численные значения фактора, следует после вывода, например, изолиний отключить все активные позиции на соответствующей цветовой шкале (воспользоваться кнопкой **Выкл.**).

При активном маркере **Выдавать значения напряжений в узлах пластин и объемных элементов** в опциях настройки параметров среды (страница **Результаты**) соответствующие значения будут показаны на схеме вместе со значениями в центрах элементов.

Если в диалоговом окне цветовой шкалы некоторые интервалы отключены, то оцифровка (или ее отсутствие) на отключенных интервалах зависит от состояния маркера **Не производить оцифровку для отключенных интервалов цветовой шкалы**, расположенного на странице общих настроек фильтров (см. рис. 10.3-3) и на панели **Визуализация результатов** .

## Выборочный вывод значений на изолиниях, изополях и эпюрах



Вывод цифровых значений различных факторов может быть выполнен не для всех, а только для выбранных узлов/элементов (рис. 10.3-4). Поскольку выбор узлов и элементов, как правило, связан с выполнением определенных операций, то для выборочной оцифровки используется специальная селекция, которая включается кнопкой-маркером **Выбор объектов для отображения информации** —  . Эта кнопка расположена на панели **Управление выбором** и продублирована в строке состояния.

Для выборочной селекции при выводе результатов расчета следует:

- активировать фильтр **Отображать информацию на схеме только для выбранных узлов и элементов** —  ;
- активировать фильтр вывода числовых значений —  ;
- активировать кнопку-маркер —  ;
- выбрать нужные объекты на схеме.

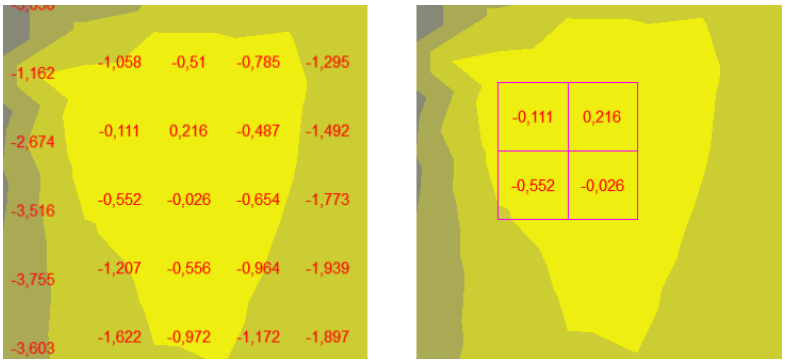



Рис. 10.3-4. *Пример полной и выборочной оцифровки*

Следует отметить, что, воспользовавшись комбинацией кнопок  и  , можно в постпроцессоре локализовать вывод на схеме и другой информации об узлах и элементах, например, номеров узлов или имен типов жесткости.

## Управление выводом изополей

В программе предусмотрены две формы представления изополей — с контрастным переходом между соседними цветами (рис. 10.3-6 *а*) и градиентная, обеспечивающая плавный переход между цветами

соседних диапазонов (рис. 10.3-6 *б*). Переход к градиентной отрисовке выполняется активацией одноименного маркера на странице фильтров **Оцифровка** (рис. 10.3-5).

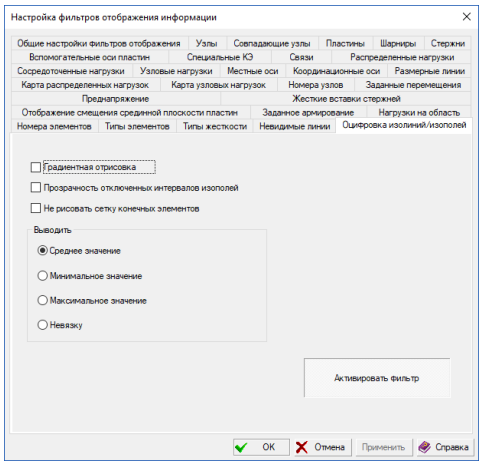



Рис. 10.3-5. *Страница* **Оцифровка**

*а*) *б*)

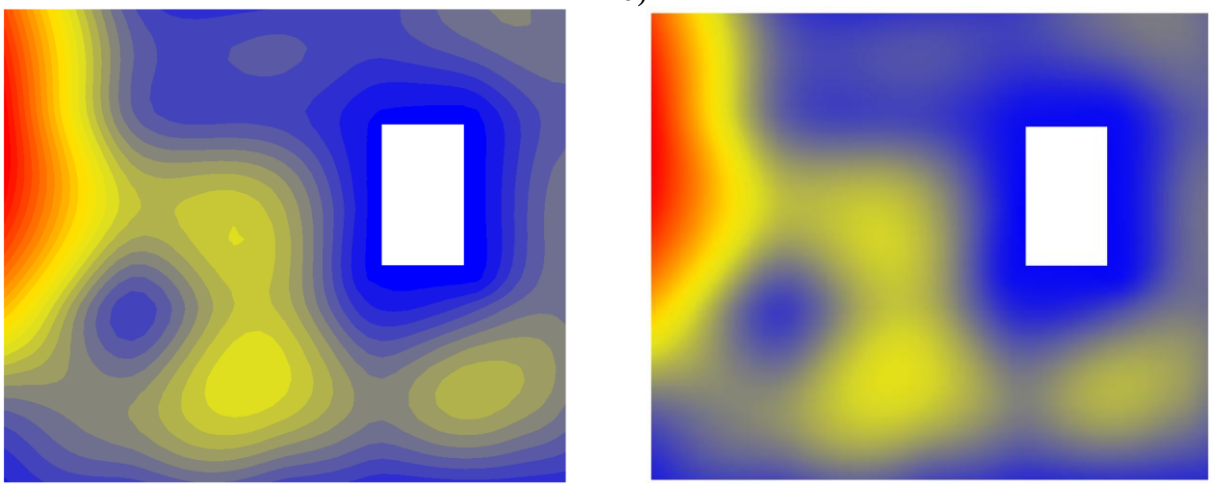


Рис. 10.3-6. *Контрастная а) и градиентная б) формы представления изополей*

При отключении части диапазонов цветовой шкалы может сложиться ситуация, когда на пространственной модели зоны изополей с активными диапазонами будут невидимы (рис. 10.3-7). «Открыть» невидимые зоны можно путем активации маркера *Прозрачность отключенных интервалов изополей* (рис. 10.3-8).

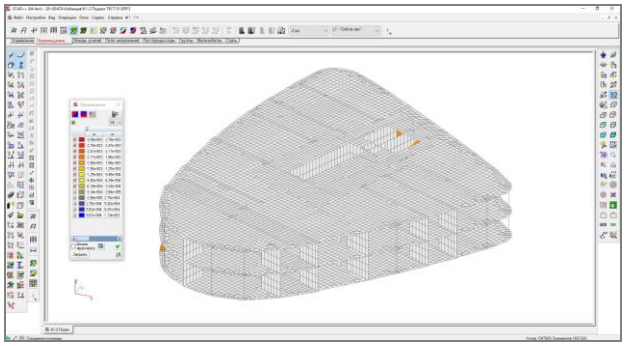


Рис. 10.3-7. *Изополя активных диапазонов «скрыты»*

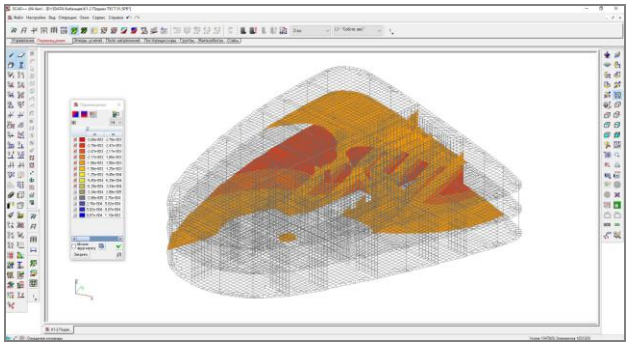


Рис. 10.3-8. *Изополя активных диапазонов видимы*

## 10.4. Настройка параметров среды

Настройка параметров среды выполняется путем вызова многостраничного диалогового окна из одноименного пункта раздела **Настройки**. Окно содержит три страницы: **Расчетная схема**, **Результаты** и **Управление анимацией**.

Страница **Расчетная схема** (рис. 10.4-1) включает следующие элементы управления отображением:

- опцию раздельного отображения пластин, при выполнении которой пластинчатые элементы отображаются (рис. 10.4-2) с интервалом, разделяющим соприкасающиеся элементы (опция позволяет контролировать положение стержневых элементов, расположенных между пластинами);
- опцию «заливки» распределенных нагрузок на стержневые элементы, что позволяет визуально разделить нагрузки на стержни и пластины (рис. 10.4-3);
- ползунок для выбора размера изображения узлов;
- ползунок для выбора размера изображения цветовых маркеров;
- ползунок для выбора уровня фоновой освещенности при использовании кнопки фильтров **Включить/выключить освещение**;
- маркер включения режима автоматического сохранения результатов работы и строку для задания временного интервала между операциями сохранения;
- кнопки выбора величины отступа от узлов при объемном отображении стержневых элементов, что позволяет избежать неточностей при визуализации в случае, когда несколько стержневых элементов приходят в один узел (если размеры отступов превышают длину стержня, профиль не рисуется);
- маркер для включения режима восстановления ранее заданных параметров среды при повторном открытии файла проекта;
- ограничения на число строк в журнале изменений и на число возможных операций отмены изменений.

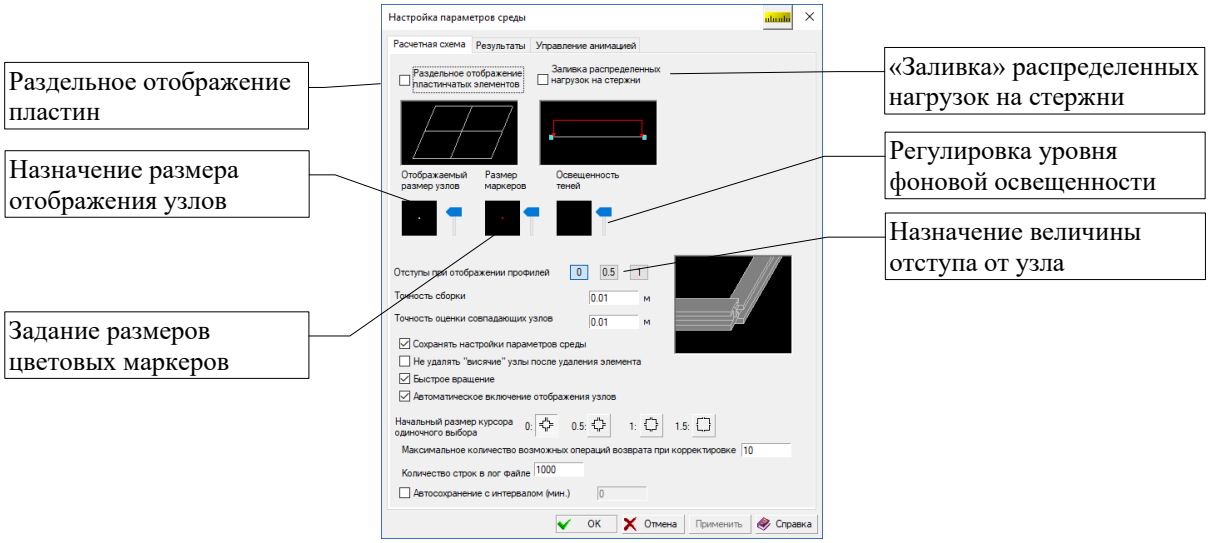



Рис. 10.4-1. *Страница* **Расчетная схема** *окна* **Настройка параметров среды**

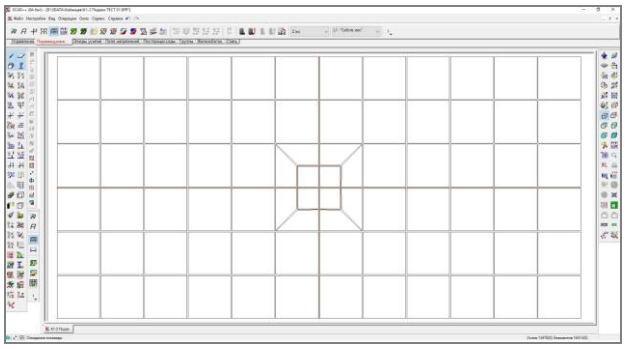


Рис. 10.4-2. *Расчетная схема с раздельным отображением пластин*

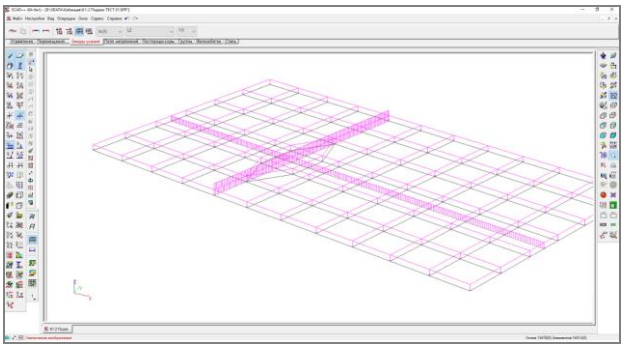


Рис. 10.4-3. *Равномерно распределенная нагрузка на стержневых и пластинчатых элементах*

Кроме того, на этой странице задаются значения точности оценки совпадения координат узлов, необходимые при выполнении сборки схемы из подсхем и других операций синтеза расчетной схемы, включая удаление совпадающих узлов, ввод стержневых элементов через группу узлов, лежащих на одной прямой и т. п.

Включение маркера **Не удалять "висячие" узлы после удаления элемента** приводит к тому, что при удалении элемента узлы, к которым не примыкает ни один другой элемент, автоматически не удаляются.

Опция **Быстрое вращение** включает режим отрисовки схемы при ее вращении, при котором рисуется только "проволочная" модель расчетной схемы. По завершении вращения на экране появляется изображение схемы в новом положении со всей информацией.

Если включена опция **Автоматическое включение отображения узлов**, то при начале работы любой операции, в которой нужен выбор узлов (например, удаление узлов, ввод стержня, ...) будет автоматически включен фильтр отображения узлов  (автоматическое отключение этого фильтра не производится).

Операция автоматического сохранения выполняется по следующим правилам:

- каждая модель может иметь свое время автосохранения;
- автосохранение модели выполняется в случае, если в промежуток времени между последним сохранением и текущим временем в модель вносились изменения;
- пользователь может задать количество файлов автосохранения;
- при выполнении автосохранения в журнале появляется соответствующее сообщение.

Страница **Результаты** (рис. 10.4-4) содержит следующие элементы управления отображением:

- маркер включения режима выдачи значений силовых факторов в узлах для пластинчатых элементов;
- назначения критерия пологости оболочки (косинус угла между нормалями к соприкасающимся участкам расчетной схемы), служащего для определения связности силовых факторов соприкасающихся участков расчетной схемы (см. ниже);
- маркер включения режима штриховки эпюр усилий и выбор шага штриховки. Если шаг между линиями штриховки (**Шаг штриховки эпюр усилий**) задан равным единице, это соответствует максимальной плотности штриховки. При значениях шага 1.5 или 2 плотность штриховки, соответственно, уменьшается в полтора или два раза. На рис. 10.4-5 приводится пример отображения эпюр на расчетной схеме при включенном маркере **Штриховать эпюры усилий**;
- маркер **Двухцветные эпюры усилий**. Если этот маркер включен, то при отрисовке эпюр будут использоваться различные цвета для частей эпюр с положительными и отрицательными значениями выбранного силового фактора;
- при оцифровке эпюр для каждого стержневого конечного элемента выводится число, которое соответствует максимальному по абсолютной величине значению силового фактора. Маркер

**Выводить минимум и максимум при оцифровке эпюр** позволяет получить для каждого элемента пару чисел (разделенных двоеточием) с минимальным и максимальным значением усилия (если эти значения различаются);

- если взведен маркер **Учитывать конструктивные элементы при оцифровке эпюр усилий,** то для ранее созданных конструктивных элементов (стальных или железобетонных) меняются правила оцифровки эпюр усилий — значения максимума/минимума приводятся не для каждого конечного элемента, входящего в конструктивный элемент, а только для тех конечных элементов, на которых достигается экстремальное значение, определенное по эпюре на конструктивном элементе (данное правило не распространяется на дополнительные конструктивные элементы);
- опция сохранения реакций в узлах от форм динамических загружений.

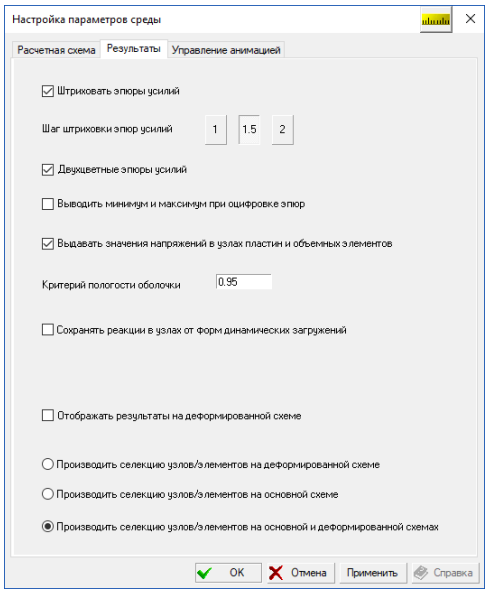



Рис. 10.4-4. *Страница* **Результаты**

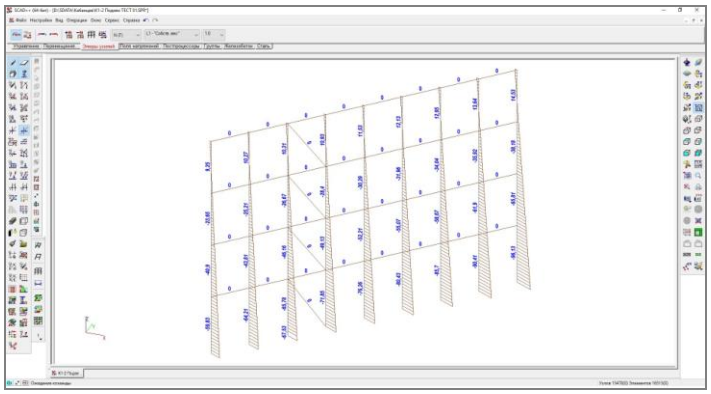


Рис. 10.4-5. *Отображение эпюр на расчетной схеме*

Параметр **Критерий пологости оболочки** позволяет различать два случая, схематически представленные на рисунках 10.4-6, 10.4-7. В первом из них (рис. 10.4-6) малы двухгранные углы между конечными элементами, образовавшиеся при замене гладкой поверхности оболочки многогранной конструкцией из плоских конечных элементов. При определении значений напряжений в узлах вполне допустимо использование осреднения данных, взятых из всех конечных элементов, примыкающих к узлам (предполагается, что направления выдачи усилий в этих элементах заданы корректно). Во втором случае (рис. 10.4-7), когда рассматривается угол здания, двухгранный угол между стенами велик. В этом случае поля напряжений следует строить раздельно для каждой стены. Тогда усреднение в узлах будет выполняться для каждой стены в отдельности.

Таким образом, **Критерий пологости оболочки** определяет максимальное значение косинуса угла между нормалями к поверхности смежных элементов, в зависимости от которого будет выбрано правило построения полей напряжений:

- если на расчетной модели угол между нормалями к поверхностям смежных элементов меньше угла, задаваемого значением параметра **Критерий пологости оболочки**, то величины напряжений в вершине угла усредняются по всем элементам, примыкающим к узлу (рис. 10.4-6);
- если на расчетной модели угол между нормалями к поверхностям смежных элементов больше угла, задаваемого значением параметра **Критерий пологости оболочки**, то величины напряжений в вершине угла усредняются по двум элементам, как например, показано на рис. 10.4-7.

По умолчанию в программе значение этого параметра принято равным 0.95, что примерно соответствует углу $18^{o}$. Если значение параметра задать равным 1, то усреднение не выполняется, и каждый элемент будет иметь «собственную» систему изополей.

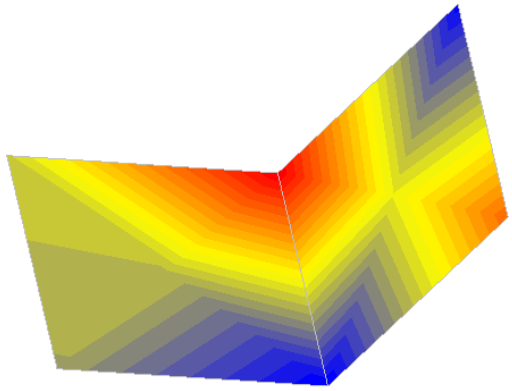


Рис. 10.4-6. *Изополя на пологих оболочках*

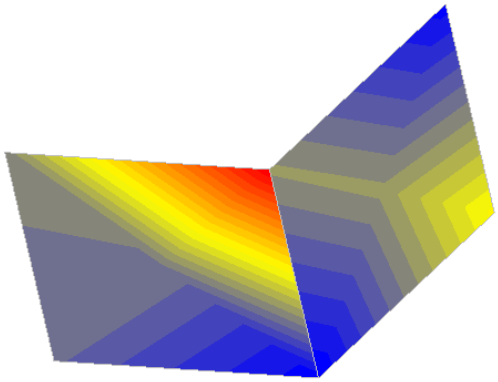


Рис. 10.4-7. *Изополя на угловой линии*

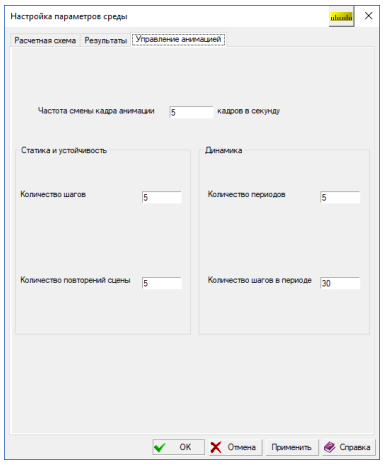



Рис. 10.4-8. *Страница* **Управление анимацией**

Графическое отображение результатов (например, изополя напряжений) могут отображаться как на деформированной, так и на недеформированной схеме. Одноименный маркер на странице **Результаты** позволяет произвести выбор нужного варианта.

При работе с постпроцессором часто возникает необходимость выбора узлов/элементов (например, для создания групп). Специальная группа кнопок позволяет задать правила работы в ситуации, когда на экране есть деформированная схема. Имеется возможность производить выбор только на недеформированной схеме, только на деформированной или на обеих. Если одной из схем на экране нет, то автоматически будет обеспечен режим выбора на той схеме, которая присутствует на экране.

Страница **Управление анимацией** (рис. 10.4-8) служит для назначения параметров управления анимацией в режимах анализа перемещений и форм потери устойчивости для статических и динамических загружений. В качестве параметров для статических загружений и форм потери устойчивости задаются количество шагов (кадров) в одной сцене «фильма» и количество повторений сцены. Для форм динамических загружений задаются количество периодов и количество шагов в периоде.

Общим параметром является частота смены кадров.

**Так же, как и другие параметры, настройки параметров графической среды сохраняются в файле проекта (например, spr-файле). Если же окно настройки этих параметров активировано из меню *Настройки* в тот момент, когда нет открытых моделей, то сохраненные величины будут использованы для всех вновь создаваемых проектов.**

Цветовые настройки, которые используются для вновь создаваемых проектов, хранятся в файлах:

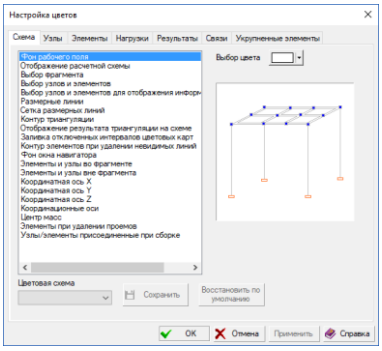
- custom.color;

- presentation.color;
- soft.color;
- standard.color;
- white.color.

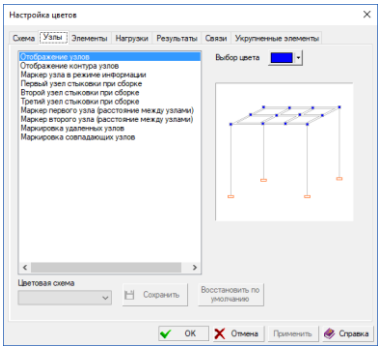
Файлы находятся в директории "C:\Users\All Users\SCAD Soft\Data\". Сохранив эти файлы перед установкой новой версии и скопировав их после установки по указанному выше пути, пользователь получает возможность использовать (для новых проектов) ранее настроенные цвета.

## 10.5. Настройка цветовой схемы

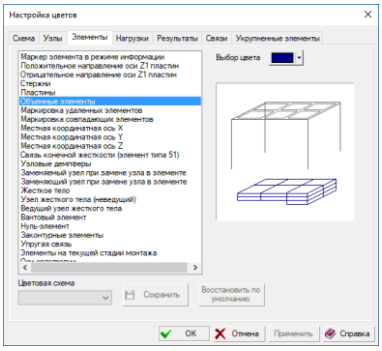
Для удобства работы с комплексом предусмотрена операция настройки цветов всех элементов отображения информации на расчетной схеме. Настройка цветовой схемы вызывается из одноименного пункта раздела меню ***Настройки*** и доступна как в режиме подготовки исходных данных, так и при анализе результатов расчета. Настройки выполняются в многостраничном диалоговом окне **Настройка цветов** (рис. 10.5-1, *а–ж*), которое включает следующие страницы: **Схема**, **Узлы**, **Элементы**, **Нагрузки**, **Результаты**, **Связи**, **Укрупненные элементы**.



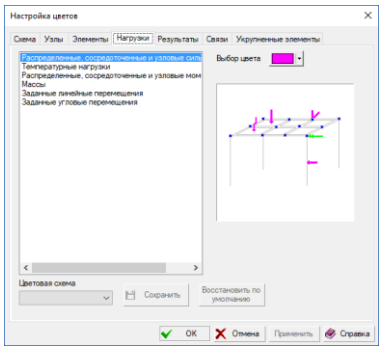

*а)*



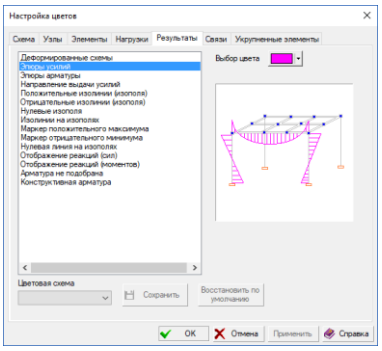

*б)*



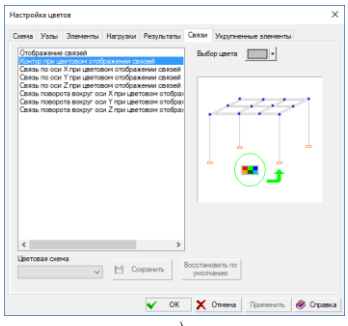

*в)*



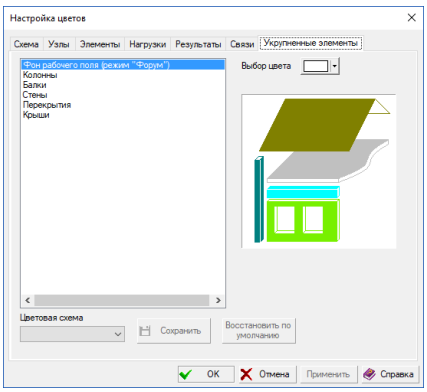

*г)*




*д)*




*е)*




*ж)*

Рис. 10.5-1. *Диалоговое окно* **Настройка цветов** *страницы: а)* **Схема**, *б)* **Узлы**, *в)* **Элементы**, *г)* **Нагрузки**, *д)* **Результаты**, *е)* **Связи**, *ж)* **Укрупненные элементы**

Для настройки цвета любого из возможных элементов изображения следует выбрать его наименование из списка элементов и установить нужный цвет, используя кнопку **Выбор цвета**. Результаты выбора будут отображаться в окне предварительного просмотра на фоне всех ранее выполненных настроек. Переход на установленный цвет выполняется нажатием кнопки **Применить**.

В программе предусмотрено несколько «стандартных» цветовых схем **Стандарт**, **Белый фон**, **Мягкий,** ..., которые можно использовать, выбрав нужный вариант из выпадающего списка **Цветовая схема**. При этом будут загружены соответствующие цвета, которые после этого можно изменить. Измененную цветовую настройку можно сохранить, используя одноименную кнопку. Кнопка **Восстановить по умолчанию** позволяет вернуть стандартную цветовую схему, т. е. такую, какой она была после первоначальной установки программы.



**Настройки цветов сохраняются в файле проекта (например, spr-файле). Если же окно настройки этих параметров активировано из меню *Настройки* в тот момент, когда нет открытых моделей, то сохраненные цвета будут использованы для всех вновь создаваемых проектов.**

# 11. Управление расчетом

Выполнение расчета возможно только при условии, когда исходные данные текущего проекта содержат обязательный минимум информации, т. е. геометрию расчетной схемы, описание жесткостных характеристик всех элементов и, по крайней мере, одно загружение.

Активация расчета выполняется из соответствующего раздела **Дерево проекта**. После этого появляется многостраничное диалоговое окно **Параметры расчета** (рис. 11.1-1).

На странице **Общие параметры** этого окна следует указать режим работы процессора (**Полный расчет** или **Продолжение расчета**) и выбрать метод решения (Гаусс, Многофронтальный, Итерационный или PARFES). Кроме того, на этой и других страницах следует задать необходимые параметры настройки вычислительного процесса.

## 11.1. Общие параметры

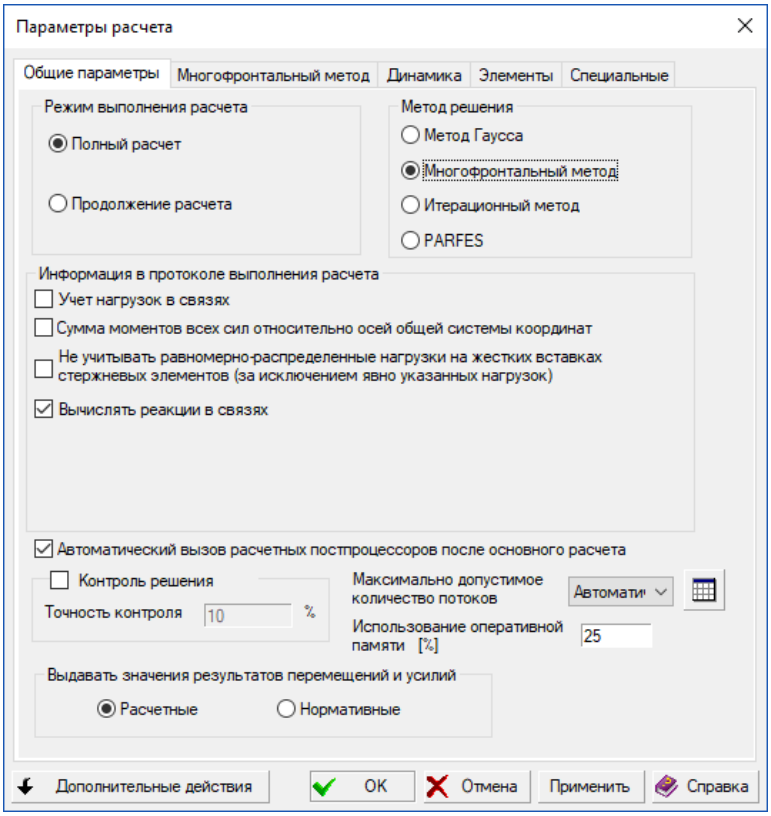



Рис. 11.1-1. *Страница* **Общие параметры** *диалогового окна* **Параметры расчета**

Режим **Продолжение расчета** рекомендуется использовать после модификации исходных данных, которые не затрагивали узлы, связи и элементы (например, после корректировки нагрузок).

Прежде, чем описать параметры настройки, обратим внимание на кнопку **Дополнительные действия**, установленную на каждой странице и определяющую правила работы с заданными параметрами. При нажатии на эту кнопку появляется меню, в котором можно выбрать одно из трех действий:

- **восстановить значения по умолчанию** — устанавливает все параметры настройки в исходное (определенное в программе) состояние;
- **сохранить значения в качестве шаблона** — позволяет записать параметры настройки в файл настроек **SCAD** и в дальнейшем загружать в другие задачи;
- **восстановить значения из шаблона** — устанавливает все параметры настройки в состояние, которое было сохранено предыдущей операцией.

**Так же, как и другие параметры, настройки расчета сохраняются в файле проекта (например, spr-файле). Если же окно настройки параметров расчета активировано из меню *Настройки* в тот момент, когда нет открытых моделей, то сохраненные величины будут использованы для всех вновь создаваемых проектов. Рекомендуется произвести анализ производительности многопоточных вычислений (см ниже) и установить оптимальное число потоков для всех вновь создаваемых моделей.**

На странице **Общие параметры** предусмотрены следующие настройки:

- **Контроль решения** — маркер позволяет включить или отключить процедуру контроля точности решения;
- **Точность контроля** — задается при включенном маркере **Контроль решения** и определяет погрешность в режиме контроля решения системы уравнений (по умолчанию 10%), превышение которой приводит к выдаче сообщения с указанием полученной величины ошибки и прекращению дальнейшего расчета;
- **Учет нагрузок в связях** — при активации этой опции в протокол попадают значения суммарных нагрузок в узлах с учетом нагрузок, приходящих в узлы с наложенными связями;
- **Сумма моментов всех сил относительно осей общей системы координат** — при активации этой опции в протокол попадают значения компонент главного момента внешних сил;
- **Автоматический вызов расчетных постпроцессоров после основного расчета** — если опция активна, то после выполнения статического и динамического расчетов будут выполнены расчеты комбинаций загружений, расчетных сочетаний усилий и некоторых других задач, для которых подготовлены исходные данные;
- **Не учитывать равномерно-распределенные нагрузки на жестких вставках стержневых элементов (за исключением явно указанных нагрузок)** — опция позволяет исключить из расчета часть внешней нагрузки, которая попадает на вставки (действие опции не распространяется на нагрузки, для которых указано, что нагрузки на жесткие вставки учитываются всегда);
- **Вычислять реакции в связях** — если опция активна, то в процессе расчета будут определены реакции в связях;
- **Максимально допустимое количество потоков** — позволяет ограничить число потоков, которое может запускать программа при расчете; если выбрать опцию *автоматически*, то программа сама выберет оптимальное число потоков; если же на фоне расчета планируется запускать параллельно другие приложения, то пользователь может ограничить число потоков и тем самым оставить часть вычислительных возможностей для работы других программ (кнопка  позволяет проанализировать производительность при различном числе потоков);
- **Использование оперативной памяти** — процент использования оперативной памяти для хранения данных, не связанных с решением систем уравнений;
- программа позволяет также выбрать, какие значения перемещений/усилий/напряжений будут выдаваться в постпроцессоре — **расчетные** или **нормативные** (если в качестве нормативного документа по вычислению комбинаций нагрузок выбран EN 1990, то данные элементы управления отсутствуют и программа всегда вычисляет нормативные (характеристические) значения перемещений/усилий/напряжений).

**Для распараллеливания вычислительных операций часто используются не только процессор компьютера (CPU), но и процессоры видеокарты. SCAD производит параллельные вычисления, используя только возможности многопоточных CPU. Процессоры видеокарты (GPU) при этом используются только для графических операций. Это связано с**

**тем, что на обычных графических картах (которые использует абсолютное большинство пользователей) слишком велики интегральные потери на операции обмена данными. Это приводит к ситуации, при которой ускорение собственно вычислений нивелируется операциями обмена, что, как правило, приводит к увеличению общего времени работы.**

**Вероятно, использование GPU может быть эффективно для нелинейных задач небольшой размерности, требующих много итераций. Кроме того, нужное быстродействие могут обеспечить специальные достаточно дорогие видеокарты типа Tesla. Однако их использование в программе не предусмотрено, поскольку повышение производительности по сравнению с CPU наблюдается только для очень больших матриц жесткости с очень малой плотностью заполнения (см. [21], [22]).**

В зависимости от выбранного метода решения меняется наименование второй страницы **Параметры метода Гаусса** (рис. 11.2-1), **Многофронтальный метод** (рис. 11.3-1), **Параметры метода итераций** (рис. 11.4-1) или **PARFES** (рис. 11.5-1).

## 11.2. Метод Гаусса

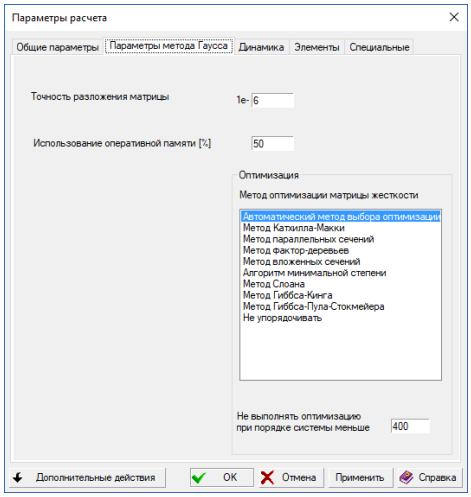



Рис. 11.2-1. *Страница* **Параметры метода Гаусса**

При использовании метода Гаусса на соответствующей странице (рис. 11.2-1) задается параметр **Точность разложения матрицы,** который определяет минимальную величину элемента матрицы жесткости, считающуюся отличной от нуля (по умолчанию принимается значение $10^{-6}$). Если в процессе разложения матрицы на главной диагонали возникает число меньше заданной точности, то такая ситуация интерпретируется как геометрическая изменяемость системы.

Параметр **Использование оперативной памяти (%)** — указывает процент оперативной памяти, используемый для хранения информации в процессе решения системы уравнений (по умолчанию 40%).

Кроме того, есть возможность выбрать метод оптимизации матрицы жесткости и указать, при каком минимальном значении порядка системы уравнений не выполнять оптимизацию.

## 11.3. Многофронтальный метод

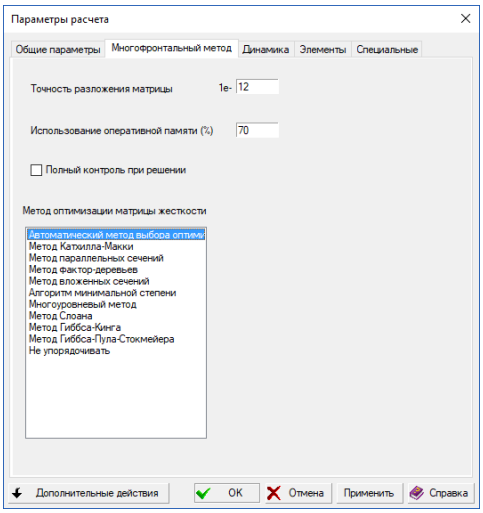



Рис. 11.3-1. *Страница* **Многофронтальный метод**

На странице **Многофронтальный метод** (рис. 11.3-1) задается параметр **Точность разложения матрицы,** который определяет минимальную величину элемента матрицы жесткости, считающуюся отличной от нуля (по умолчанию принимается значение $10^{-12}$). Если в процессе разложения матрицы на главной диагонали возникает число меньше заданной точности, то такая ситуация интерпретируется как геометрическая изменяемость системы.

Параметр **Использование оперативной памяти (%)** — указывает процент оперативной памяти, используемый для хранения информации в процессе решения системы уравнений (по умолчанию 70%).

Кроме того, есть возможность выбрать метод оптимизации матрицы жесткости.

При активном маркере **Полный контроль при решении** выполняется контроль точности решения для всех загружений.

## 11.4. Итерационный метод

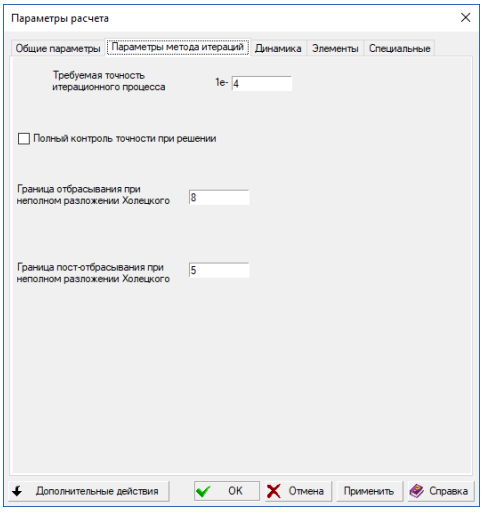
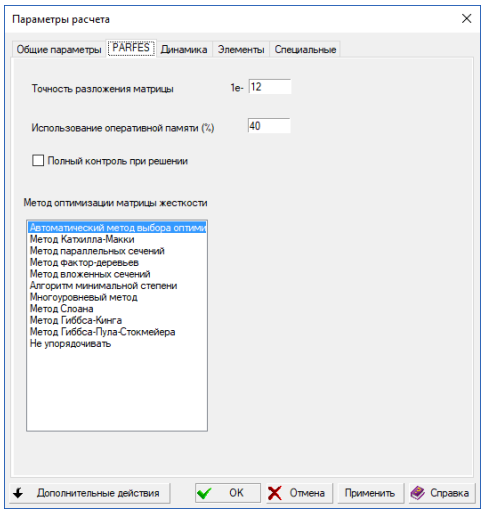



Рис. 11.4-1. *Страница* **Параметры метода итераций**

На странице **Параметры метода итераций** (рис. 11.4-1) устанавливается **Требуемая точность итерационного процесса** и опция **Полный контроль точности при решении**. Последняя дает возможность получить информацию о погрешности решения для каждого загружения.

Остальные параметры рекомендуется изменять только по указанию разработчиков.

## 11.5. PARFES




На странице **PARFES** (Parallel Sparse Direct Solver) (рис. 11.5-1) задается параметр **Точность разложения матрицы,** который определяет минимальную величину элемента матрицы жесткости, считающуюся отличной от нуля (по умолчанию принимается значение $10^{-12}$). Если в процессе разложения матрицы на главной диагонали возникает число меньше заданной точности, то такая ситуация интерпретируется как геометрическая изменяемость системы.

Параметр **Использование оперативной памяти (%)** — указывает процент оперативной памяти, используемый для хранения информации в процессе решения системы уравнений (по умолчанию 40%).

Кроме того, есть возможность выбрать метод оптимизации матрицы жесткости.

Рис. 11.5-1. *Страница* **PARFES**

## 11.6. Устойчивость

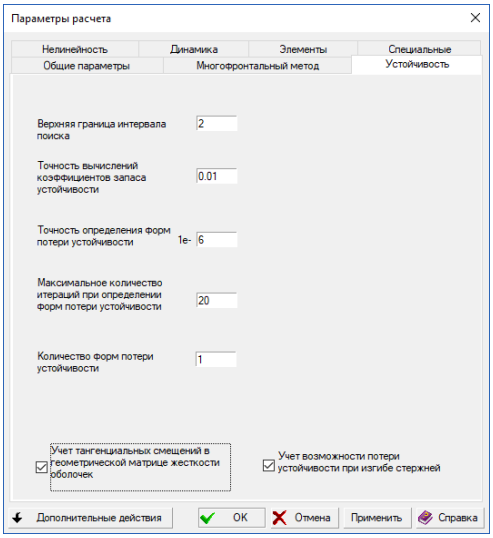



Рис. 11.6-1. *Страница* **Устойчивость**

На странице **Устойчивость** (рис. 11.6-1) назначаются следующие параметры:

- **Верхняя граница интервала поиска** — максимально допустимое увеличение интенсивности нагрузок, определяющее диапазон поиска значения коэффициента запаса устойчивости (по умолчанию 2);
- **Точность вычислений коэффициентов запаса устойчивости** — точность определения коэффициента запаса устойчивости (по умолчанию 0.01);
- **Точность определения форм потери устойчивости** — допустимая погрешность при определении формы потери устойчивости (по умолчанию $10^{-6}$ для линейных смещений);
- **Максимальное количество итераций при определении форм потери устойчивости** — количество итераций, после которого выполняется прерывание плохо сходящегося процесса (100 по умолчанию);
- **Количество форм потери устойчивости** — параметр определяет умолчание для числа форм потери устойчивости задач, в которых данные по устойчивости еще не задавались;

- **Учет тангенциальных смещений в геометрической матрице жесткости оболочек** — параметр позволяет отказаться от учета тангенциальных смещений при анализе устойчивости оболочек;
- **Учет возможности потери устойчивости при изгибе стержней**[1] — параметр позволяет отказаться от учета возможности потери устойчивости при изгибе стержней (если этот маркер отключен, то результаты анализа устойчивости будут соответствовать результатам предыдущих версий **SCAD**, в которых данная возможность не была реализована).

Приведенная на рисунке 11.6-1 страница настройки режима анализа устойчивости доступна при начальной настройке программы (при этом, все проекты должны быть закрыты). Информация о верхней границе поиска коэффициента запаса устойчивости, точности его вычисления и количестве форм потери устойчивости задаются для каждой конкретной задачи. Значения перечисленных параметров по умолчанию загружаются в соответствующие поля диалогового окна **Проверка общей устойчивости системы** (см. раздел 25) и могут быть изменены.

## 11.7. Динамика

На странице **Динамика** (рис. 11.7-1) выбирается метод решения задачи на собственные значения (итерация подпространств, метод скорейшего спуска или метод Ланцоша). Здесь указывается вариант, «предпочтительный» для всех загружений, его можно затем изменить при задании исходных данных к динамическому загружению. Тогда же вводятся и дополнительные параметры режима.

Метод Ланцоша решения задачи на собственные значения задается на странице **Динамика** и имеет высший приоритет.

На данной странице с помощью маркеров задается информация, которая будет выведена в протокол расчета:

- данные динамики;
- графики коэффициентов динамичности;
- коэффициенты для вычисления инерционных нагрузок (например, для сейсмических воздействий будут выведены коэффициенты динамичности $\beta$ и коэффициенты $\eta$, зависящие от формы деформации здания или сооружения).

Здесь же задаются точности решения задачи на собственные значения для метода Ланцоша и метода итерации подпространств и метода наискорейшего спуска.

В программе реализован блочный метод Ланцоша со спектральными преобразованиями [16] – [17], обеспечивающий четыре режима расчета: модальный, интервальный, сейсмический и режим верификации расчетной модели. На странице **Динамика** пользователь может выбрать два варианта (расчетный режим или режим верификации расчетной модели). Если выбран первый вариант, то программа автоматически (в зависимости от данных того или иного динамического загружения) выберет режим работы (модальный, сейсмический или интервальный). Если выбран режим верификации расчетной модели, то будут вычислены только формы колебаний (на основании которых могут быть найдены ошибки в расчетной модели); вычисления перемещений, усилий, ... в этом случае производиться не будут.

[1] Анализ плоской формы изгиба рассматривается для стержней с узким прямоугольным сечением в классической работе Тимошенко С.П. Курс теории упругости. — Киев: Наукова думка, 1972. 508 с.

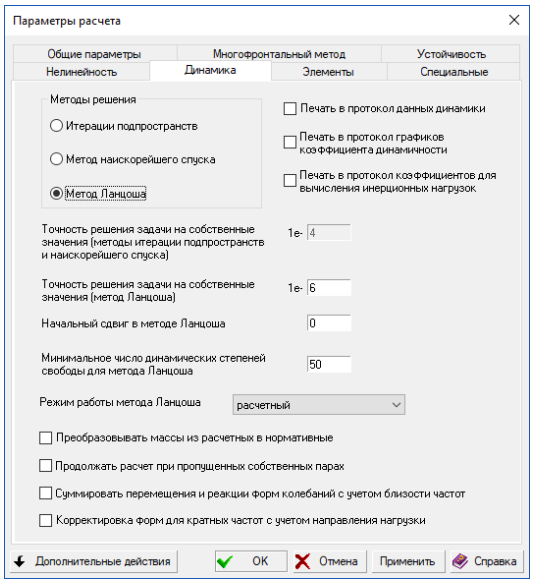



Рис. 11.7-1. *Страница* **Динамика** *диалогового окна* **Параметры расчета**

*Модальный* анализ — определяется количество частот и форм колебаний, заданное на странице **Модальный анализ** диалогового окна **Параметры динамических воздействий** (см. раздел 8.7). Если в процессе итераций сошлось большее количество собственных пар, то результаты расчета содержат все эти пары.

*Интервальный* режим — определяет все собственные пары (частоты и формы) в частотном интервале, заданном на странице **Динамика** диалогового окна **Параметры расчета** при настройке режима работы метода Ланцоша.

*Сейсмический* режим определяет частоты и формы собственных колебаний до тех пор, пока сумма модальных масс по каждому из направлений X, Y и Z не превысит заданные в диалоге «параметры динамических воздействий» значения. Так же, как и в случае интервального режима заранее не известно, какое количество собственных пар подлежит определению.

Режим *верификация расчетной модели* — предназначен для обнаружения геометрической изменяемости расчетной модели. Количество нулевых или очень близких к нулю собственных чисел покажет, сколько раз вырождена матрица жесткости, а соответствующие им собственные векторы – формы движения механизма. Визуализация форм движения в режиме анализа перемещений позволяет получить информацию, подсказывающую, каким образом можно исправить расчетную модель. В исходных данных режима верификации используется параметр *начальный сдвиг в методе Ланцоша*. По умолчанию он задан равным нулю и изменяется автоматически. В некоторых (достаточно редких) случаях этот параметр можно задать по рекомендации разработчиков.

Эксперименты показывают, что достаточно часто метод Ланцоша ведет себя численно неустойчиво на малых задачах. Поэтому предусмотрена возможность указать **минимальное число динамических степеней свободы**. Если в задаче это число меньше выбранного, то программа автоматически будет использовать другой метод.

Одним из способов задания масс при динамическом расчете является преобразование статического загружения. Расположенный на данной странице маркер **Преобразовывать массы из расчетных в нормативные** определяет правило такого преобразования, которое используется для всех динамических загружений (если в качестве нормативного документа по вычислению комбинаций нагрузок выбран EN 1990, то данный элемент управления отсутствует).

Если в нормативном документе есть указания по учету близости частот и пользователь установил соответствующую опцию (например, при расчетах по СП 14.13330.2014), то суммирование усилий производится по соответствующей формуле, приведенной в нормативном документе. Для того, чтобы по тем же правилам производилось суммирование перемещений и реакций, следует установить маркер **Суммировать перемещения и реакции форм колебаний с учетом близости частот**.

Маркер **Корректировка форм для кратных частот с учетом направления нагрузки** предназначен для использования специальной процедуры работы с формами колебаний, соответствующими кратным частотам. Если этот маркер взведен, то выполняется поворот суммарного вектора на такой угол, при котором будет максимизирован его вклад в общую динамическую реакцию конструкции.

Учет корреляционных связей между всеми модальными парами, который предлагает формула (5.13) СП 14.13330.2018 с Изменением № 1 и других нормативных документов, приводит к очень громоздким вычислениям. Следует, однако, учитывать, что точность используемых расчетных процедур должна отвечать точности используемых исходных данных. А поскольку при

сейсмических расчетах эта точность невысока, то многие руководства рекомендуют не учитывать корреляцию между формами, для которых значение коэффициента корреляции меньше чем 0,2 (см., например, Бирбраер А.Н. *Расчет конструкций на сейсмостойкость* — СПб.: Наука, 1988). В программе **SCAD** граница отбрасывания коэффициентов корреляции принята по умолчанию равной 0,1. Точность может быть увеличена пользователем в поле ввода **Точность коэффициентов матрицы корреляции форм колебаний**.

## 11.8. Нелинейность

На странице **Нелинейность** (рис. 11.8-1) задаются следующие параметры:

- **Точность итерационного процесса**;
- **Не добавлять автоматически статическую часть загружения динамического ветра в нелинейное загружение**;
- **Число шагов, добавленных в нелинейное загружение для статической части динамического ветра**;
- **Обход ложной разгрузки**;
- **Вычислять усилия в геометрически нелинейных стержнях с учетом их деформации.**

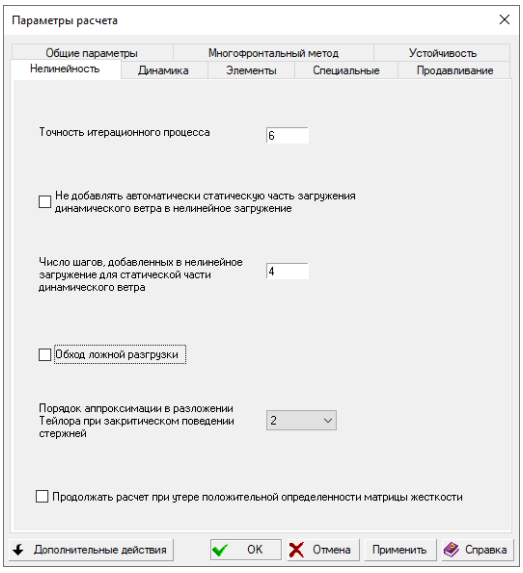



Рис. 11.8-1. *Страница* **Нелинейность**

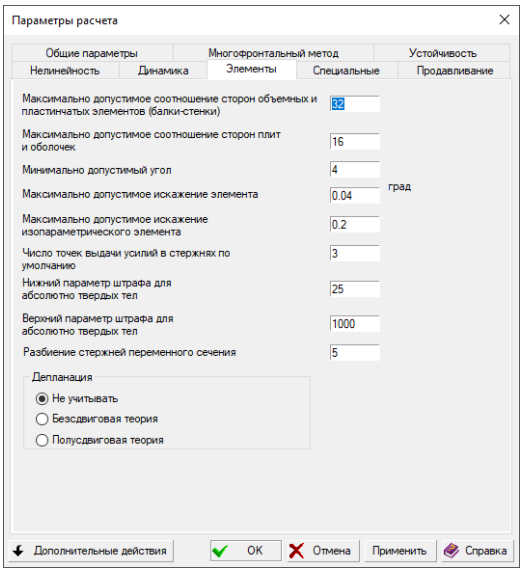



Рис. 11.9-1. *Страница* **Элементы**

Ложная разгрузка возникает при учете разгрузки (пластичность, а не нелинейная упругость), когда итерационный процесс еще не сошелся, но для его сходимости необходимо уменьшить уровень напряжений, причем это уменьшение физически не имеет места. Иногда это приводит к запиранию сходимости. При активации маркера «обход ложной разгрузки» каждый шаг итераций отсчитывается не от предыдущего шага итераций, а от начального напряженно-деформированного состояния на текущем приращении нагрузки. Рекомендуется включать эту опцию только для однородных материалов и только в том случае, когда возникают проблемы со сходимостью, которые никак иначе (в первую очередь – уменьшением шага по нагрузке) не решаются. Для железобетона при наличии ниспадающей ветви диаграммы σ – ε этого делать нельзя, поскольку заблокируется сходимость итерационного процесса.

Пользователь имеет возможность сам сформировать нелинейное загружение, включив в него статическую часть динамического ветра.

При нелинейных расчетах возможны ситуации, при которых на некотором шаге матрица жесткости системы перестает быть положительно определенной. По умолчанию в этой ситуации программа прекращает работу. Использование данного маркера **Продолжать расчет при утере положительной определенности матрицы жесткости** позволяет продолжить расчет, определить по тексту протокола последний “хороший шаг” и произвести анализ результатов.

В случае геометрически нелинейного расчета продольная сила T растяжения/сжатия направлена по касательной к деформированной продольной оси стержня. Тогда можно различать величину этой силы и значение ее проекции N на первоначальное (недеформированное) положение продольной оси.

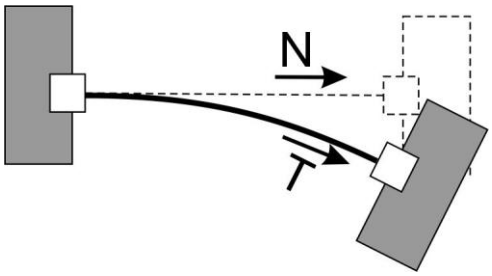



Рис. 11.8-3. *Поперечное сечение при малых углах поворота*

По умолчанию программа выдает значения N, но имеется возможность получить усредненное по длине стержня значение T. Для этого следует активировать опцию **Вычислять усилия в геометрически нелинейных стержнях с учетом их деформации**.

## 11.9. Элементы

На странице **Элементы** (рис. 11.9-1) задается **число точек выдачи усилий в стержнях по умолчанию**. Это число будет использоваться при вычислении усилий в стержнях для всех стержневых элементов, где данный параметр не установлен явно в конкретном элементе (элементах).

При контроле геометрической формы конечных элементов используются ограничения, которые установлены перечисленными ниже параметрами:

- **Максимально допустимое соотношение сторон объемных и пластинчатых элементов (балки-стенки)**;
- **Максимально допустимое соотношение сторон плит и оболочек**;
- **Минимально допустимый угол**;
- **Максимально допустимое искажение элемента**;
- **Максимально допустимое искажение изопараметрического элемента**.

Нарушение ограничений, которые определены перечисленными выше параметрами, интерпретируется программой как ошибка, выдается соответствующее сообщение, и расчет не производится.

При расчете стержневых элементов переменного сечения **SCAD** моделирует их набором стержней, каждый из которых имеет постоянное сечение. Количество таких стержней задается параметром **Разбиение стержней переменного сечения**. По умолчанию этот параметр равен 5, что вполне обеспечивает достаточно точный результат. Но пользователь может задать и большее значение (но не более 100).

Конечные элементы типа абсолютно твердое тело реализованы с использованием множителей Лагранжа. При этом используются параметры (подробное описание см. в статье [23]):

- **нижний параметр штрафа**;
- **верхний параметр штрафа**.

Изменять значения этих величин, принятых по умолчанию, следует только при наличии рекомендаций разработчиков.

Программа **SCAD** позволяет при определении напряженно-деформированного состояния учесть возможную депланацию, возникающую в тонкостенных стержнях и вычислить бимомент и момент стесненного кручения. По умолчанию депланация не учитывается. Для ее учета следует установить нужную опцию в группе **Депланация**. Реализованы расчеты на основании бессдвиговой или полусдвиговой теории тонкостенных стержней.

## 11.10. Продавливание

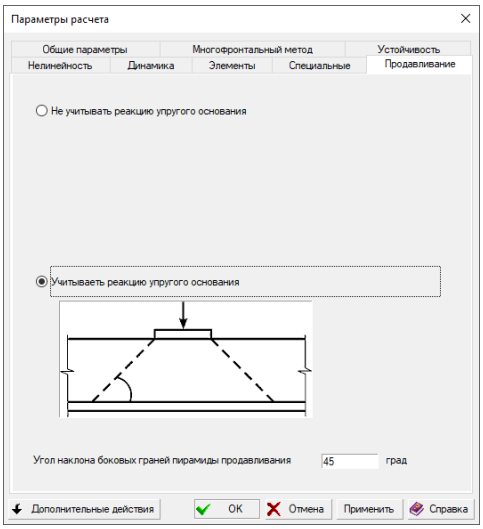
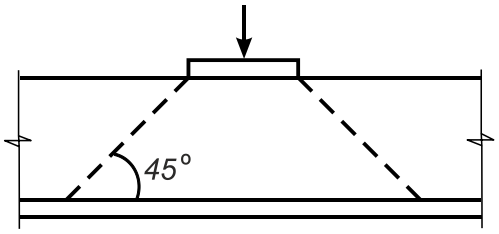



Рис. 11.10-1. *Страница* **Продавливание**

На странице **Продавливание** (рис. 11.10-1) определяются правила учета нагрузок продавливания при наличии упругого основания. Предусмотрено две опции — не учитывать отпор упругого основания или учитывать отпор. В последнем случае следует ввести угол наклона боковых граней пирамиды продавливания (по умолчанию равный 45º):




## 11.11. Специальные настройки

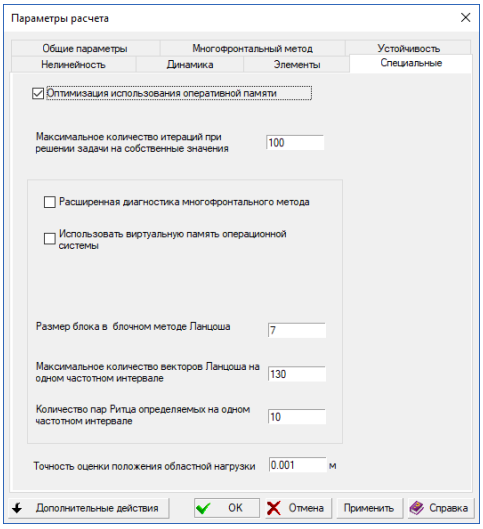



Рис. 11.11-1. *Страница* **Специальные**

На странице **Специальные** (рис. 11.11-1) настраиваются следующие параметры:

- **Максимальное количество итераций при решении задачи на собственные значения**;
- **Оптимизация использования оперативной памяти** — если этот маркер включен, то расчет выполняется в отдельном процессе, в противном случае используется основной процесс программы **SCAD**;
- **Использовать виртуальную память операционной системы** — при решении очень больших задач и ограниченном объеме оперативной памяти можно включить этот маркер (при этом расчет может существенно замедлиться, но это повышает размерность задач, которые могут быть решены).

Вносить изменения в другие параметры на этой странице следует только по рекомендации разработчиков.

## 11.12. Использование оперативной памяти

Скорость выполнения расчетов, особенно больших задач, зависит от размера доступной задаче оперативной памяти. Правила распределения памяти на различных этапах вычислительного процесса могут быть определены пользователем. Для этого предусмотрены специальные настройки "процентов памяти" на двух страницах диалогового окна **Параметры расчета** — на странице **Общие параметры**, где назначаются параметры, не зависящие от выбранного метода расчета, и на странице настроек, зависящих от выбранного метода расчета.

Указанные "проценты памяти" применяются для получения максимально возможного участка непрерывной оперативной памяти, доступной процессу. Отметим, что в случае использования 32-х разрядной версии программы каждому процессу доступно не более чем 3.2 Гб независимо от количества оперативной памяти, установленной на компьютере.

Следует различать 3 различные ситуации, которые возникают в процессе расчета.

1. Разложение матрицы (например, с использованием метода PARFES), когда нужна только память для размещений "кусков" матрицы жесткости. В этом случае, если на странице настроек PARFES величина параметра **Использование оперативной памяти** задана 70%, то программа будет пытаться взять до 70% от свободной памяти, доступной процессу.
2. Вычисление перемещений, когда нужна память для размещений правых частей (векторов нагрузок), вычисляемых перемещений и "кусков" разложенной матрицы жесткости. Предположим, что на странице **Общие параметры** указано, что можно использовать 40% памяти. Программа возьмет 40% от свободной памяти, доступной процессу, и будет их использовать для размещения правых частей и перемещений. Оставшуюся память (но не более, чем 70%) программа использует для "кусков" разложенной матрицы жесткости. Если свободных 70% нет — возьмет, сколько возможно.
3. Вычисление усилий, РСУ. Производится заказ памяти, согласно настройке на странице **Общие параметры**.

На странице настроек **Специальные** активный маркер **Использовать виртуальную память операционной системы** позволяет программе при расчете использовать не только оперативную память, но и виртуальную. Использование данного маркера без рекомендаций разработчиков нежелательно, поскольку это может привести к значительному замедлению процесса расчета.

## 11.13.Оптимизация матрицы жесткости

На страницах настроек метода Гаусса, многофронтального метода и PARFES имеется возможность выбора метода оптимизации матрицы жесткости.

В программе предусмотрены следующие методы оптимизации:

- Обратный алгоритм Катхилла-Макки;
- Метод параллельных сечений;
- Метод фактор-деревьев;
- Метод вложенных сечений;
- Алгоритм минимальной степени;
- Многоуровневый метод;
- Метод Слоана;
- Метод Гиббса-Пуле-Стокмейера;
- Метод Гиббса-Кинга.

Кроме того, в списке методов имеется пункт **Автоматический выбор метода оптимизации**. Если выбран этот пункт, то программа произведет попытку оптимизации несколькими методами и выберет наилучший. В зависимости от используемого метода решения при автоматическом выборе будет произведен перебор методов, которые перечислены в таблице:

| | Метод Гаусса | Многофронтальный метод | PARFES |
|---|---|---|---|
| Обратный алгоритм Катхилла-Макки | + | | |
| Алгоритм минимальной степени | | + | + |
| Многоуровневый метод | | + | + |
| Метод Слоана | + | + | + |

Как уже указывалось в главе 2, задача определения оптимальной перенумерации степеней свободы принадлежит к числу “трудно решаемых задач”, поэтому все алгоритмы оптимизации являются эвристическими. Если автоматический выбор не дает существенного снижения параметров матрицы жесткости (например, профиля матрицы), то целесообразно попробовать другие реализованные в программе методы, явно выбирая их из списка.

Для задач с небольшим числом степеней свободы оптимизация матрицы нецелесообразна, поскольку время, затраченное на оптимизацию, может превысить время решения неоптимизированной задачи. Поэтому в поле **Не выполнять оптимизацию при порядке системы меньше**... можно указать предельное значение числа степеней свободы, при достижении которого будет произведена оптимизация матрицы.

## 11.14.Многопоточные вычисления

Большинство современных CPU (Central Processor Unit) являются многоядерными, то есть включают в свой состав несколько независимых физических ядер, которые могут работать одновременно. Кроме того, каждое из ядер может поочередно реализовывать несколько потоков (технология «hyper-threading»), создавая тем самым несколько логических процессоров на основе каждого физического ядра.

При выполнении расчетных операций (разложение матрицы жесткости, расчет перемещений, усилий и т. п.) практически все вычисления производятся с использованием многопоточного режима, т. е. с параллельной обработкой данных. При этом пользователь может назначить (выбрать из списка) максимальное количество потоков, которые могут быть использованы для текущей задачи.

При увеличении числа потоков, как правило, растет производительность программы и сокращается время выполнения расчета. Такой рост будет наблюдаться в тех случаях, когда назначенное пользователем количество потоков не превышает число физических ядер.

Если в списке **Максимально допустимое количество потоков** будет выбран признак *Автоматически*, то «оптимальное» количество потоков определяется программой, и оно будет принято равным полусумме числа физических и числа логических ядер. Если **максимально допустимое количество потоков** установить большим числа физических ядер, то в зависимости от конкретной модели CPU производительность может увеличиться незначительно, а в некоторых случаях может и понизиться (потоки начинают "мешать" друг другу).

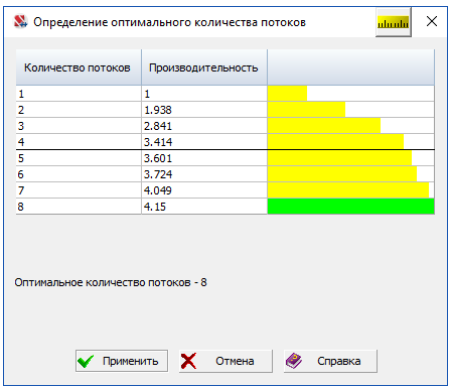



Рис. 11.14-1. *Диалоговое окно* **Определение оптимального количества потоков**

Для анализа производительности конкретного CPU на странице **Общие параметры** диалогового окна **Параметры расчета** предусмотрена кнопка  , нажатие которой активирует операцию определения оптимального количества потоков. Результаты выполнения операции отображаются в одноименном диалоговом окне (рис. 11.14-1).

Перед назначением параметра **Максимально допустимое количество потоков** рекомендуется проанализировать зависимость производительности от числа потоков. Это связано с тем, что для многих CPU использование максимально допустимого количества логических потоков может, при минимальном увеличении производительности работы вычислений в **SCAD**, привести к значительному понижению скорости работы других программ, которые работают параллельно со **SCAD**.

## 11.15.Описание решателей

### Линейная и нелинейная статика

В задачах линейной статики решается система линейных алгебраических уравнений

$$\mathbf{Kx} = \mathbf{b}, \qquad (1)$$

где **K** – симметричная (как правило, разреженная) матрица жесткости, возникающая при применении метода конечных элементов к задачам строительной механики и механики деформируемого твердого тела; **x**, **b** – векторы неизвестных и правых частей (загружений). В задачах нелинейной статики используется метод Ньютона – Рафсона или модифицированный метод

Ньютона – Рафсона. На каждой итерации решается система линеаризованных алгебраических уравнений вида (1), в которой **K** – симметричная матрица тангенциальной жесткости, **x** – вектор приращения перемещений и углов поворота на текущей итерации, **b** – вектор невязки.

Для решения системы линейных алгебраических уравнений (1) в программном комплексе **SCAD** применяются как прямые методы, так и итерационный – метод сопряженных градиентов с предобуславливанием.

Прямые методы – многофронтальный и PARFES – используют обобщенное разложение Холецкого

$$\mathbf{K} = \mathbf{L}\cdot\mathbf{S}\cdot\mathbf{L}^{T}, \tag{2}$$

где **L** – разреженная нижняя треугольная матрица, **S** – диагональ знаков, обобщающая разложение Холецкого на случай неопределенных матриц, типичный при решении задач модального анализа и устойчивости. Затем выполняется прямая подстановка

$$\mathbf{L}\mathbf{y} = \mathbf{b} \rightarrow \mathbf{y}, \tag{3}$$

диагональное масштабирование

$$\mathbf{S}\mathbf{z} = \mathbf{y} \rightarrow \mathbf{z}, \tag{4}$$

и обратная подстановка

$$\mathbf{L}^{T}\mathbf{x} = \mathbf{z} \rightarrow \mathbf{x}. \tag{5}$$

Кроме того, метод Гаусса использует разложение:

$$\mathbf{K} = \mathbf{L}\cdot\mathbf{U}, \tag{6}$$

где **L**, **U** – соответственно нижняя и верхняя треугольные матрицы, после чего выполняются прямая (3) и обратная подстановки

$$\mathbf{U}\mathbf{x} = \mathbf{y} \rightarrow \mathbf{x}. \tag{7}$$

При использовании итерационного метода исходная задача (1) сводится к виду

$$\mathbf{B}^{-1}\mathbf{K}\mathbf{x}_i = \mathbf{B}^{-1}\mathbf{b}_i,\ i \in [1, N_r], \tag{8}$$

где $i$ – номер правой части, $N_r$ – количество правых частей, **B** – оператор предобуславливания, конструируемый так, чтобы система уравнений $\mathbf{B}\mathbf{z}_i^k = \mathbf{r}_i^k \rightarrow \mathbf{z}_i^k$, имеющая тот же порядок, что и (1), решалась значительно быстрее, чем (1), и система уравнений (6) обладала лучшей обусловленностью, чем (1): $Cond(\mathbf{B}^{-1}\mathbf{K}) < Cond(\mathbf{K})$, где $Cond(...)$ – число обусловленности. Тогда сходимость (6) будет быстрее. Здесь $\mathbf{r}_i^k = \mathbf{b}_i - \mathbf{K}\mathbf{x}_i^k$ – вектор невязки на текущем шаге итерации $k$. Процедура решения состоит из двух этапов: создания предобуславливания и итерационного процесса метода сопряженных градиентов. Условия, при которых происходит завершение итерационного процесса, описаны ниже.

### Многофронтальный решатель

Это прямой метод решения систем линейных алгебраических уравнений (1). В программном комплексе **SCAD** этот метод реализует идею метода суперэлементов с автоматическим разбиением исходной расчетной модели на подконструкции без вмешательства пользователя и представлен в публикациях [1-5] как блочный метод подконструкций BSMFM – block substructure multifrontal method. Разложение разреженной матрицы большой размерности сводится к последовательности разложений плотных матриц относительно небольшой размерности (фронтальных матриц), что

позволяет эффективно использовать практически все методы достижения высокой производительности, доступные на многоядерных настольных компьютерах. Разложенная матрица хранится в плотных блоках. Если размерность задачи превышает возможности оперативной памяти, блоки разложенной матрицы помещаются в файл на диске.

Точность разложения матрицы определяется параметром $\varepsilon_t$, позволяющим при факторизации идентифицировать вырожденность матрицы или плохую обусловленность (по умолчанию принимается $10^{-12}$ – рис. 11.3-1).

Перед разложением собирается диагональ матрицы жесткости **K**. Если на каком-либо шаге разложения фронтальной матрицы окажется, что $|\mathbf{L}_{jj}/\mathbf{K}_{jj}| < \varepsilon_t$, где $\mathbf{L}_{jj}$ – диагональный элемент факторизованной матрицы, то матрица жесткости или особенная, или плохо обусловленная. Для того, чтобы можно было продолжить разложение матрицы, элементу $\mathbf{L}_{jj}$ присваивается большая величина ($10^{50}$). В конце разложения выдается список всех степеней свободы, в которых это произошло. Параметр $\varepsilon_t$ допустимо уменьшать до $10^{-14}$. Однако если при этом снова появляются сообщения о геометрической изменяемости, то расчет следует прервать. Скорее всего данная расчетная модель геометрически изменяема. Следует найти причину геометрической изменяемости и устранить ее (для этого можно использовать блочный метод Ланцоша в режиме верификации расчетной модели).

Кроме того, может оказаться, что расчетная модель приводит к плохо обусловленной системе линейных алгебраических уравнений. Такие системы обладают высокой чувствительностью к малым возмущениям правой части и накапливают большие ошибки при разложении матрицы. Поэтому необходимо выяснить причину плохой обусловленности и ее устранить. *Понижать параметр* $\varepsilon_t$ *далее* (*например, до* $10^{-50}$) *– это все равно что игнорировать показания термометра при гриппе или заклепывать предохранительный клапан в котле.*

Использование оперативной памяти – параметр, регулирующий максимальный размер оперативной памяти для решателя. Если вы хотите решить задачу как можно быстрее, задайте 80 – 90%. Тогда решатель не будет использовать медленную дисковую память до тех пор, пока не исчерпает всю свободную оперативную память. Если свободной оперативной памяти достаточно для решения данной задачи, то разложение матрицы будет выполнено максимально быстро. Если же недостаточно, то решатель все равно будет использовать дисковую память. Если параметр «использование оперативной памяти» превышает объем оперативной памяти, требуемый для разложения матрицы без использования диска, решатель использует ровно столько оперативной памяти, сколько требуется, а не столько, сколько заказано. Если же Вы хотите одновременно решать несколько задач на одном компьютере, то тогда для каждой задачи параметр «использование оперативной памяти» должен быть задан так, чтобы все решаемые одновременно задачи не превысили объема свободной оперативной памяти. Задавать этот параметр более чем 90% нужно осторожно, так как при некоторой конфигурации компьютера можно вызвать интенсивный обмен со страничным файлом операционной системы, значительно замедлить процесс расчета и получить временное блокирование всего компьютера. Далее решение задачи будет продолжено.

Практика вычислений показывает, что контроль при разложении матрицы, основанный на анализе $|\mathbf{L}_{jj}/\mathbf{K}_{jj}| < \varepsilon_t$, срабатывает не во всех случаях, поскольку при задании параметра $\varepsilon_t$ мы не имеем никакой информации об обусловленности матрицы **K**. При этом возможно как пропустить геометрическую изменяемость при слишком малом значении $\varepsilon_t$, так и поднять «ложную тревогу» при слишком большом. Поэтому рекомендуется использовать опцию «полный контроль при решении», при задании которой для каждого загружения выполняется анализ величин $\varepsilon_i = \|\mathbf{b}_i - \mathbf{K}\mathbf{x}_i\|_2/\|\mathbf{b}_i\|_2$, $i \in [1, N_r]$, где $i$ – номер загружения, $N_r$ – количество загружений, $\mathbf{b}_i$ – вектор нагрузки, $\mathbf{x}_i$ – вектор решения, $\|\ldots\|_2$ – эвклидова норма вектора, $\varepsilon_i$ – мера ошибки. Для хорошо обусловленных систем уравнений $\varepsilon_i < 10^{-8}$. Если $\varepsilon_i > 10^{-4}$, то мы считаем решение неприемлемым вследствие слишком большой ошибки. Значение $10^{-8} < \varepsilon_i < 10^{-4}$ указывает на то, что система уравнений является «плохо обусловленной» – расчетная модель еще является корректной, но небольшие модификации могут привести ее к некорректной. Вычисленные значения $\varepsilon_i$ помещаются в файл с расширением p04, находящийся в каталоге SWORK. Вычисление $\varepsilon_i$ выполняется только для линейного статического анализа и блокируется при анализе частот и форм собственных колебаний,

устойчивости и нелинейном анализе. Если опция «полный контроль при решении» отключена, то $\varepsilon_i$ не вычисляется.

Задачей упорядочения матрицы является уменьшение количества ненулевых элементов в факторизованной матрице жесткости, что позволяет в десятки раз ускорить разложение матрицы и в несколько раз – прямые и обратные подстановки [4]. К сожалению, какой из методов упорядочения является оптимальным, заранее неизвестно. Поэтому, если данная задача решается впервые, то целесообразно предоставить выбор оптимального метода упорядочения решателю. Для этого надо в параметрах расчета выбрать «Автоматический метод выбора оптимального упорядочения». Если топология расчетной модели не менялась и выполняется повторный расчет, а метод упорядочения для задачи работает долго, можно задать метод упорядочения, который был выбран программой в предыдущем расчете в режиме автоматического выбора. Тогда решатель возьмет назначенный метод, и не будет тратить время на поиск оптимального. Если же этап оптимизации матрицы жесткости выполняется быстро, то при повторных расчетах не стоит отказываться от автоматического выбора метода упорядочения.

### PARFES

PARFES [6-11] – Parallel Finite Element Solver – прямой метод для разреженных матриц, разработанный специально для многоядерных компьютеров и рабочих станций с общей памятью (shared memory computers). PARFES относится к классу суперузловых решателей и реализует блочную версию разложения Холецкого. Практически во всех случаях на компьютерах с общей памятью этот метод демонстрирует более высокую производительность и ускоряемость при увеличении количества процессоров, чем многофронтальный решатель. Для достижения пиковой производительности необходимо, чтобы задача полностью помещалась в оперативной памяти. В противном случае решатель автоматически выбирает режим OOC (out of core), при котором подключается внешний диск. В этом режиме производительность метода на этапе разложения матрицы снижается незначительно по сравнению с режимом работы в оперативной памяти, однако существенно возрастает время прямых/обратных подстановок. В случае большой задачи и малого объема оперативной памяти режим OOC становится недоступным, и PARFES выбирает режим OOC1. В этом режиме решатель использует значительно меньший объем оперативной памяти, чем в режиме OOC, однако выполняет значительно большее количество обменов с диском, что приводит к значительному снижению производительности на этапе разложения матрицы. Время прямых и обратных подстановок остается точно таким же, как и в режиме OOC.

PARFES работает при любом методе упорядочения. Использует все методы достижения высокой производительности, доступные на компьютерах с общей памятью.

Точность разложения матрицы, использование оперативной памяти, полный контроль при решении и выбор метода упорядочения полностью соответствуют представленным выше опциям многофронтального метода.

### Итерационный решатель

Реализует метод сопряженных градиентов с предобуславливанием неполного разложения Холецкого $\mathbf{B} = \mathbf{H}\cdot\mathbf{H}^T$, где $\mathbf{H}$ – нижняя треугольная матрица. В программном комплексе **SCAD** разработан метод неполной факторизации Холецкого, основанный на технологии разреженных матриц, позволяющий существенно ускорить сходимость при умеренном увеличении размера неполного фактора Холецкого $\mathbf{H}$ [12-13]. Упорядочение производится алгоритмом минимальной степени [14].

Параметры (рис. 11.4-1) отбрасывания и пост-отбрасывания $\psi$, $\psi_1$ ($0 < \psi < \psi_1 < 1$) управляют способностью предобуславливания ускорять сходимость. При разложении матрицы удерживаются только «малые элементы» – $\mathbf{H}_{ij}^2 \geq \psi\, \mathbf{H}_{ii}\mathbf{H}_{jj}$. Чем меньше $\psi$, тем ближе неполный фактор Холецкого $\mathbf{H}$ к полному фактору $\mathbf{L}$ и тем быстрее сходится решение. Однако при этом тем больший объем оперативной памяти необходим для хранения $\mathbf{H}$ и тем больше времени требуется для выполнения неполного разложения Холецкого и для выполнения итераций. Для слишком малых значений $\psi$ может не хватить объема оперативной памяти. Тогда решатель увеличивает $\psi$ в 10 раз и пробует снова выполнить неполное разложение Холецкого. И так до тех пор, пока неполный фактор

Холецкого **H** удастся сохранить в оперативной памяти. Поэтому при повторных расчетах на этом же компьютере целесообразно воспользоваться опытом первого расчета и принять значение параметра $\psi$ таким, при котором удалось завершить неполную факторизацию. Это позволит избежать лишних попыток разложения.

С другой стороны, на компьютерах с большим объемом оперативной памяти может оказаться, что слишком малое значение $\psi$ приводит к значительному возрастанию времени неполной факторизации. Вообще способов определения оптимального значения параметра $\psi$ не существует. Это зависит от обусловленности системы линейных алгебраических уравнений, объема оперативной памяти, размерности задачи, количества правых частей и необходимости выполнять модальный/сейсмический анализ. Поэтому дадим следующие рекомендации. На 32-разрядной платформе значение параметра $\psi$ по умолчанию принимается $10^{-9}$. С него и следует начинать. На 64-разрядной платформе большинство компьютеров на сегодняшний день располагают большим объемом доступной для операционной системы оперативной памяти. Поэтому мы рекомендуем принять значение $\psi$ в пределах $10^{-12}$ – $10^{-14}$. Если для данной задачи окажется, что размер **H** превышает возможности оперативной памяти, то решатель Вас «поправит» и уменьшит $\psi$. Если неполное разложение Холецкого длится неоправданно долго, следует прервать вычисления и увеличить $\psi$.

После окончания факторизации производится вторичное отбрасывание – удерживаются только те элементы, для которых $\mathbf{H}_{ij}^2 \geq \psi_1 \mathbf{H}_{ii}\mathbf{H}_{jj}$. Это позволяет ускорить процедуру прямых/обратных подстановок в процессе итераций и уменьшить объем требуемой оперативной памяти. Обычно значение $\psi_1$ принимается на три порядка больше, чем значение $\psi$.

Процедура неполной факторизации распараллелена. Распараллеливание процедуры итераций осуществляется за счет того, что каждая правая часть итерируется независимо от остальных в отдельном потоке. Поэтому время решения задачи, содержащей большое количество загружений, существенно зависит от количества ядер (процессоров) на вашем компьютере.

Итерационный процесс продолжается до тех пор, пока $\varepsilon_i > \varepsilon_t$, где $\varepsilon_i = \|\mathbf{b}_i - \mathbf{K}\mathbf{x}_i\|_2/\|\mathbf{b}_i\|_2$, $i \in [1, N_r]$, $\varepsilon_t$ – требуемая точность.

Итерационный решатель может быть эффективен для решения очень больших задач (несколько миллионов уравнений), а также в тех случаях, когда прямые решатели работают в режимах, требующих использования дисковой памяти.

Итерационный решатель доступен для следующих видов анализа: линейная и нелинейная статика, модальный и сейсмический анализ (спектральный метод).

### Метод Гаусса

Метод Гаусса (см. [15]) – прямой метод для симметричных разреженных матриц – реализует LU разложение (6). Выбор ведущего элемента не осуществляется, поскольку в конечно-элементных расчетных моделях строительной механики и механики деформируемого твердого тела мы имеем дело с диагонально преобладающими симметричными матрицами. Параметры «точность разложения матрицы», «использование оперативной памяти» и «метод оптимизации матрицы жесткости» имеют тот же смысл, что и для PARFES и многофронтального решателя.

## 11.16.Описание динамических решателей

Задача определения нижних частот и форм собственных колебаний зданий и сооружений при решении методом конечных элементов сводится к решению алгебраической частичной обобщенной проблемы собственных значений

$$\left(\mathbf{K} - \lambda_j \mathbf{M}\right)\mathbf{V} = 0$$

Исходя из удобства вычислений данная задача приводится к виду

$$\left(\mathbf{K}_\sigma - \lambda_j \mathbf{M}\right)\mathbf{V} = 0, \qquad (11.16.1)$$

где $\mathbf{K}_\sigma = \mathbf{K} - \sigma \cdot \mathbf{M}$, $\mathbf{K}$ – матрица жесткости, $\mathbf{M}$ – диагональная или согласованная матрица масс, $\sigma$ – параметр сдвига[1], $\mathbf{V} = \{\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \ldots, \mathbf{v}_n\}$, $\mathbf{v}_i$, $i \in [1, n]$ – первые $n$ собственных векторов, подлежащие определению, $\lambda_j$ –собственные числа $\lambda_1 \le \lambda_2 \le \ldots \le \lambda_n$, причем $\lambda_i = \omega_i^2 = (2 \cdot \pi \cdot f_i)^2$, где $f_i$ [Гц] – частота собственных колебаний. Размерность задачи равна $N \ge n$, где $N$ — число степеней свободы.

В программе **SCAD** реализованы три метода модального анализа. Методы итерации подпространств и наискорейшего спуска являются классическими и описаны во многих книгах по вычислительной линейной алгебре (см., например, [18]). Реализация блочного метода Ланцоша имеет некоторые особенности, поэтому метод более подробно описан ниже.

### Метод итерации подпространств

Это классический итерационный метод, описанный, например, в главе 14 книги [18].

В алгоритме используется следующий критерий оценки ошибки расчета собственного числа $\lambda_j$:

$$\left| \frac{\lambda_j^{(k+1)} - \lambda_j^{(k)}}{\lambda_j^{(k)}} \right| < \varepsilon,$$

где $\lambda_j^{(k+1)}$, $\lambda_j^{(k)}$ — два последовательных собственных значения на $k$+1, $k$ шагах итераций, а $\varepsilon$ — означает точность, заданную в диалоге **Параметры расчета** на закладке **Динамика** (рис. 11.7-1) для метода итерации подпространств. Итерации прекращаются, если ошибка расчета меньше заданной величины $\varepsilon$ или число итераций превысило ограничение, заданное в диалоге **Параметры расчета** на закладке **Специальные** (рис 11.8-1).

### Метод наискорейшего спуска

Это классический метод, основанный на минимизации обобщенного отношения Рэлея [18, § 1.7]. Поиск минимума производится итерационным методом градиентного спуска.

В алгоритме используется следующий критерий оценки ошибки расчета собственного числа $\lambda_j$:

$$\left| \frac{\lambda_j^{(k+1)} - \lambda_j^{(k)}}{\lambda_j^{(k)}} \right| < \varepsilon,$$

где $\lambda_j^{(k+1)}$, $\lambda_j^{(k)}$ — два последовательных собственных значения на $k$+1, $k$ шагах итераций, а $\varepsilon$ — означает точность, заданную в диалоге **Параметры расчета** на закладке **Динамика** (рис. 11.7-1) для метода наискорейшего спуска.

Итерации прекращаются, если ошибка расчета меньше заданной величины $\varepsilon$ или число итераций превысило ограничение, заданное в диалоге **Параметры расчета** на закладке **Специальные** (рис. 11.11-1).

### Метод Ланцоша

Описание алгоритма блочного метода Ланцоша опубликовано в статье [16]. Используемая в **SCAD** реализация метода Ланцоша предусматривает четыре режима вычислений: *модальный*, *интервальный*, *сейсмический* и *режим верификации расчетной модели*, которые описаны ниже.

**Модальный режим.** Определяется заданное количество частот и форм собственных колебаний, которое задается в диалоге **Параметры динамических воздействий** на закладке **Модальный Анализ** (рис. 8.7-1). Начальное значение сдвига задается в диалоге **Параметры расчета** на закладке **Динамика** (рис. 11.7-1). По умолчанию принимается сдвиг $\sigma = 0$. При этом в диалоге **Параметры динамических воздействий** (рис. 8.7-1) должен быть выбран метод Ланцоша, а маркер **Анализ в заданном частотном диапазоне** должен быть отключен.

[1] Ненулевое значение сдвига используется при анализе геометрически изменяемых конструкций.

**Интервальный режим.** Интервальный режим определяет все собственные пары, заключенные в интервале [*a, b*]. В диалоге **Параметры динамических воздействий** (рис. 8.7-1) после выбора метода Ланцоша необходимо включить флажок **Анализ в заданном частотном диапазоне** и задать начальную частоту *a* и конечную *b*, которые определяют частотный интервал [*a, b*]. Следует учитывать то обстоятельство, что спектр собственных частот расчетных моделей большинства сооружений очень густой, и в диапазоне нескольких Герц может оказаться несколько тысяч собственных частот.

**Сейсмический режим.** Определяет частоты и формы собственных колебаний до тех пор, пока не будет обеспечена заданная сумма модальных масс по каждому из главных направлений сейсмического входа OX, OY, OZ (OXYZ – глобальная система координат). Кроме того, если задана частота отсечения (для этого надо включить флажок **Ограничение по максимальной частоте**, и в открывшемся окне редактирования ввести значение этой частоты), то алгоритм закончит работу тогда, как только произойдет одно из двух событий.

- Будет набрана сумма модальных масс по каждому из направлений сейсмического входа OX, OY, OZ.
- Достигнута частота отсечения.

**Режим верификации расчетной модели.** Разработан для идентификации трудно обнаруживаемых ошибок расчетных моделей, приводящих к геометрической изменяемости. Основная идея метода состоит в том, что при наличии геометрической изменяемости задача (11.16.1) содержит нулевые собственные числа, количество которых равно количеству недостающих связей, наложение которых устранило бы геометрическую изменяемость, а соответствующие этим частотам формы собственных колебаний представляют формы движения механизма. Анализ этих форм и их анимация должны помочь пользователю выявить, где именно необходимо наложить связи, чтобы сделать расчетную модель геометрически неизменяемой. Обоснование подхода и примеры применения приведены в [18, 19].

Для включения режима верификации необходимо создать динамическое загружение – модальный анализ, выбрать метод Ланцоша и задать требуемое количество собственных пар, несколько превышающих ожидаемое количество степеней свободы механизма (количество недостающих связей). В диалоге **Параметры расчета** на закладке **Динамика** выбрать метод Ланцоша, режим верификации и ввести небольшой начальный *отрицательный* сдвиг, например -0.001 Гц. Если значение начального сдвига принять по умолчанию (0 Гц), то алгоритм сам подставит значение -1 Гц. Следует помнить, что чем ближе значение сдвига к нулю, тем быстрее сходимость нулевых частот. С другой стороны, если значение сдвига слишком мало, то матрица **K** – σ**M** в случае геометрически изменяемой системы близка к особенной, и метод Ланцоша становится численно нестабильным.

При наличии геометрической изменяемости матрица **K** – особенная, поэтому мы не можем ее факторизовать. Однако матрица **K** – σ**M** особенной не является, если матрица **M** разложима по Холецкому. Поэтому в позициях нулевых диагональных элементов матрицы масс добавляются малые ненулевые элементы. По этой причине значения собственных чисел, полученных в режиме верификации расчетной модели, могут отличаться от их значений, полученных в других режимах.

**Пример**. Расчетная модель плоской фермы представлена на рисунке 11.16-1. Отсутствующий раскос показан красной прерывистой линией. Форма колебаний, соответствующая нулевой частоте, показана на рисунке 11.16-2. Начальный сдвиг принят равным -0.001 Гц.

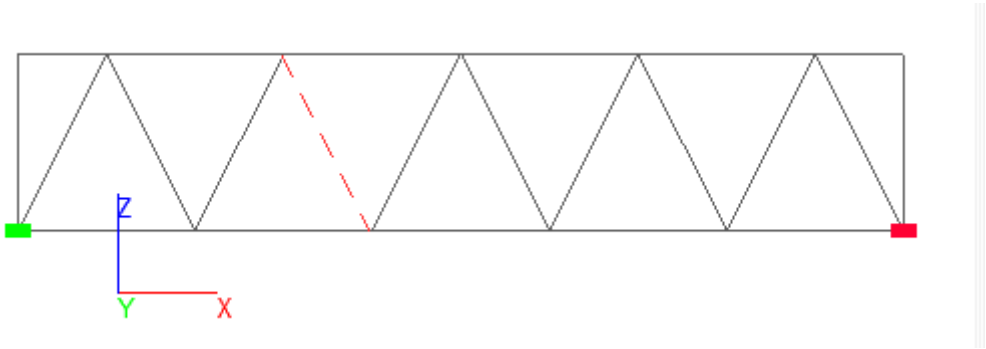



Рис. 11.16-1. *Плоская ферма. Отсутствующий стержень показан пунктиром*

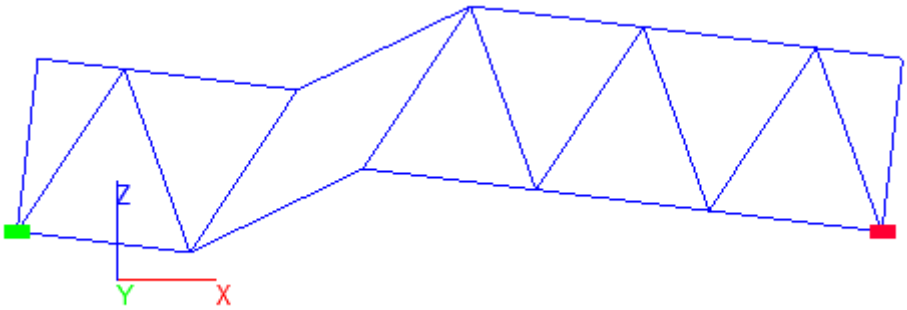



Рис. 11.16-2. *Форма колебаний для «нулевой» частоты (f* = -1.804e-006 *Гц)*

**Информация о расчете**. Полная информация о расчете находится в файле с расширением *.p04, который находится в каталоге SWORK. В частности, в этом файле содержатся данные о точности определения собственных пар (см. столбец *Prec*). В режиме верификации расчетной модели точность вычисляется на основании критерия Каниэля-Саада [18, § 12.4], в остальных случаях — это величина, равная $\frac{\left\|\mathbf{v}_i - \lambda_i \mathbf{K}^{-1}\mathbf{M}\mathbf{v}_i\right\|_2}{\left\|\mathbf{v}_i\right\|_2}$, $i \in [1, n]$.

Рекомендуется после выполнения расчета просмотреть хотя бы точность полученных результатов. Точность определения собственной пары считается приемлемой, если величина *Prec* не превосходит величины параметра **точность решения задачи на собственные значения (метод Ланцоша)** (рис. 11.7-1). Кроме того, таблица значений модальных масс $m_x$, $m_y$, $m_z$, а также сумм модальных масс $\sum m_x$, $\sum m_y$, $\sum m_z$, вычисляемых как суммы модальных масс от первой до текущей собственных форм, является важнейшей информацией для расчета на сейсмику, а также на ветровые пульсации, поскольку позволяют определить, какие формы колебаний дают существенный вклад в динамическую реакцию сооружения, а какие – нет.

## 11.17.Литература к главе Управление Расчетом

1. Фиалко С. Ю., *Применение многофронтального метода в программе SCAD для анализа большеразмерных расчетных моделей зданий и сооружений,* БСТ ПРОЕКТ, №9, 2005. – С. 61 – 63.
2. Фиалко С. Ю., *Применение многофронтального метода в программе SCAD для анализа большеразмерных расчетных моделей зданий и сооружений,* CADmaster #30/5.2005 (дополнительный) – с. 74 – 78.
3. Fialko S., *A Sparse Shared-Memory Multifrontal Solver in SCAD Software, Proceedings of the International Multiconference on Computer Science and Information Technology*; October 20-22,

2008, Wisła, Poland, 3 (2008), ISSN 1896-7094, ISBN 978-83-60810-14-9, IEEE Catalog Number CFP0864E-CDR, pages 277–283. (http://www.proceedings2008.imcsit.org/pliks/47.pdf).

4. Фиалко С. Ю., *Прямые методы решения систем линейных уравнений в современных МКЭ-комплексах* – М.: СКАД СОФТ, 2009.
5. Fialko S., *A block sparse shared-memory multifrontal finite element solver for problems of structural mechanics.* Computer Assisted Mechanics and Engineering Sciences, 16, 2009. p. 117 – 131.
6. Fialko S., PARFES: *A method for solving finite element linear equations on multi-core computers.* Advances in Engineering software. v 40, 12, 2010, pp. 1256 – 1265.
7. Фиалко С. Ю., *Прямой параллельный МКЭ решатель PARFES для многоядерных компьютеров.* III международная научно-практическая конференция "Теория и практика расчета зданий, сооружений и элементов конструкций. Аналитические и численные методы." 17 ноября 2010 г., Россия, Москва, МГСУ, стр. 496 – 508.
8. Fialko S., *Parallel Finite Element Solver for Multi-Core Computers.* Federated Conference on Computer Science and Information Systems, September 9–12, 2012. Wrocław, Poland. IEEE Xplore Digital Library, 978-83-60810-51-4, IEEE Catalog Number CFP1285N-USB. P. 525 – 532. URL: http://fedcsis.org/proceedings/fedcsis2012/pliks/101.pdf .
9. Fialko S., *Application of AVX (Advanced Vector Extensions) for Improved Performance of the PARFES – Finite Element Parallel Direct Solver*. Federated Conference on Computer Science and Information Systems, September 8–11, 2013. Kraków, Poland. IEEE Xplore Digital Library, pp. 447 – 454. https://fedcsis.org/proceedings/2013/pliks/98.pdf .
10. Фиалко С. Ю., *О параллельных решателях в конечноэлементных программных комплексах, ориентированных на многоядерные компьютеры с общей оперативной памятью.* Опір матеріалів і теорія споруд. 2015. № 94, с. 155 – 171. URL: http://opir.knuba.edu.ua/files/zbirnyk-94/13-94.pdf.
11. Fialko S. *Parallel direct solver for solving systems of linear equations resulting from finite element method on multi-core desktops and workstations*. Computers and Mathematics with Applications 70 (2015) 2968–2987. doi:10.1016/j.camwa.2015.10.009.
12. Фиалко С. Ю., *О методах решения большеразмерных задач строительной механики на многоядерных компьютерах*. Инженерно-строительный журнал ИСЖ/2013 #5(40), стр. 116 - 124. URL: http://www.engstroy.spb.ru/index_2013_05/fialko.html .
13. Fialko S., *Iterative methods for solving large-scale problems of structural mechanics using multi-core computers*. Archives of civil and mechanical engineering (ACME), 14, 2014, p. 190 – 203.
14. George A., J.W.H. Liu, *The evolution of the minimum degree ordering algorithm*, SIAM Rev. 31 (March) (1989) 1–19.
15. Писсанецки С., *Технология разреженных матриц*. — М.: Мир, 1988. —410 с.
16. Фиалко С.Ю., *Реализация в программном комплексе SCAD блочного метода Ланцоша со сдвигами применительно к сейсмическому анализу сооружений*, CADmaster #40/5.2007 (дополнительный). – с. 102 – 105.
17. Фиалко С.Ю., *Эффективные методы решения обобщенной алгебраической проблемы собственных значений*. В кн. Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. – Издание второе, Киев, 2002, с. 570-597.
18. Парлетт Б., *Симметричная проблема собственных значений. Численные методы*, М. Мир, 1983.
19. S. Yu. Fialko, E. Z. Kriksunov and V. S. Karpilovskyy, *A block Lanczos method with spectral transformations for natural vibrations and seismic analysis of large structures in SCAD software*, in Proc. CMM-2003 – Computer Methods in Mechanics, Gliwice, Poland, 2003, pp. 129 —130.
20. С.Ю. Фиалко, *Агрегатный многоуровневый метод решения конечно-элементных задач строительной механики*. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Киев, КНУБА (КИСИ), 2004.

21. M. Naumov, “Parallel Solution of Sparse Triangular Linear Systems in the Preconditioned Iterative Methods on the GPU”, https://research.nvidia.com/publication/parallel-solution-sparse-triangular-linear-systems-preconditioned-iterative-methods-gpu
22. S.Yu. Fialko, F. Zeglen, *Preconditioned Conjugate Gradient Method for Solution of Large Finite Element Problems on CPU and GPU*, Journal of Telecommunications and Information Technology, 2016, No. 2, 26-33.
23. S.Yu. Fialko, *Application of rigid links in structural design models*, International Journal for Computational Civil and Structural Engineering , 2017, 13 (3), 119-137.

# 12. Графический анализ напряженно-деформированного состояния

Графический анализ результатов расчета выполняется в той же среде, что и подготовка исходных данных. При этом меняется только инструментальная панель (рис. 12-1) и добавляются новые фильтры отображения.

В этом режиме предусмотрены следующие виды графического представления результатов: деформированное состояние конструкции, цветовые маркеры и изополя (для пластинчатых элементов) перемещений, эпюры усилий в стержневых элементах, поля напряжений для пластинчатых и объемных элементов. Кроме того отображаются результаты работы различных постпроцессоров, создаются группы узлов и элементов и др.

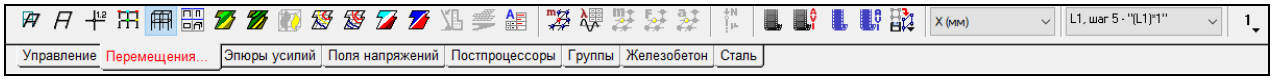



Рис. 12-1. *Инструментальная панель режима графического анализа результатов расчета*

Для выполнения этих операций в инструментальной панели предусмотрены различные разделы, переход в которые выполняется с помощью закладок:

- **Управление** — доступ к данным, печать и т. п.;
- **Перемещения** — анализ деформированного состояния;
- **Эпюры усилий** — анализ усилий в стержневых элементах;
- **Поля напряжений** — анализ напряжений и усилий в пластинчатых и объемных элементах;
- **Постпроцессоры** — анализ результатов работы постпроцессоров;
- **Группы** — формирование групп узлов и элементов, в том числе и для передачи данных в постпроцессоры;
- **Железобетон** — экспертиза и подбор арматуры в элементах железобетонных конструкций;
- **Сталь** — экспертиза и подбор сечений в элементах стальных конструкций.

## 12.1. Общие принципы управления отображением результатов

Прежде чем рассмотреть операции отображения результатов расчета, остановимся на правилах их выполнения и элементах управления отображением.

При графическом анализе результатов рекомендуется придерживаться следующей последовательности выполнения операций:

- выбрать нужное загружение из списка:
  - для статических загружений – номер анализируемого загружения или комбинации загружений;
  - для динамических загружений – номер формы колебаний;
  - для интегрирования во времени – время анализа;
- выбрать в списке факторов вид анализируемой информации;
- нажать кнопку с отображением формы представления информации.

Результаты, полученные в процессе решения задачи, можно анализировать в нескольких окнах, помещая в них различные фрагменты расчетной схемы. В окнах одновременно могут отображаться результаты расчета как по разным факторам, так и на разных фрагментах схемы. Цветовые шкалы одной задачи, принадлежащие разным окнам, отображаются одновременно, что позволяет сравнивать содержащуюся в них информацию. Инициализация нового окна выполняется операцией **Новое окно** в меню ***Окно*** (подробнее см. раздел 4.1).

Ниже приводится описание некоторых элементов управления отображением общих для всех операций анализа результатов.

## Выбор загружения

Номер загружения, комбинации нагрузок или других результатов расчета выбирается из списка (рис. 12.1-1) **Выбор загружения**, установленного в разделах инструментальной панели **Перемещения**, **Эпюры усилий**, **Поля напряжений**. Для идентификации выводимой информации используются следующие обозначения:




Рис. 12.1-1. *Список* **Выбор загружения**

- **L** – признак загружения (при нелинейном расчете используется **LN**), за которым следует номер загружения (рис. 12.1-1). Для динамических загружений при разложении по формам колебаний дополнительно выводятся номер формы и значение периода. Для остаточных членов используется обозначение форм вида **+MX,+MY,+MZ**. Имя загружения указывается только в строке со значением периода колебаний первой формы;
- **LS** – амплитуда от статической составляющей нагрузки (например, ветровой);
- **SD** – амплитуда от суммарной динамической нагрузки (свертка динамической составляющей, которая определяется по соответствующим нормативным документам);
- **LS+SD** – амплитуда от статической (например, ветровой) и суммарной динамической нагрузок;
- **RD** – действительная составляющая каждого воздействия при расчете на гармонические колебания;
- **RI** – комплексная составляющая каждого воздействия при расчете на гармонические колебания;
- **S1**, **S2**…– суммарная амплитуда от действительной и комплексной составляющих по числу воздействий;
- **LS+S1, LS+S2...** – амплитуда от статической составляющей нагрузки и *i*-й суммарной амплитуды от действительной и комплексной составляющих по числу воздействий;
- **T** – номер точки сохранения и время от начала процесса при прямом интегрировании уравнений движения (см. главу 15);
- **C** – признак комбинации загружений, за которым следует номер комбинации и ее формула;
- **M** – признак собственных форм колебаний, за которым следует номер формы и период колебаний;
- **MX, MY, ...** – результаты по 6-компонентному воздействию при расчете по акселерограммам;
- **S** – признак формы потери устойчивости для загружений;
- **SC** – признак формы потери устойчивости для комбинаций загружений.

Особенности идентификации загружений для нелинейного расчета, вариации моделей и монтажа описаны в соответствующих разделах.

Нажатие правой кнопки мыши на списке **Выбор загружений** приводит к появлению диалога, в котором можно произвести настройку и скрыть в списке отдельные типы данных, например, скрыть формы колебаний, комбинации загружений и т.п. Если список таким образом изменен, то на стрелке выпадающего списка появится дополнительный индикатор, свидетельствующий об изменении стандартных настроек (аналогично фильтрам отображения).

## Выбор анализируемого фактора

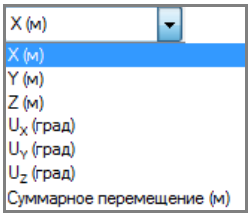



Рис. 12.1-2. *Список выбора направлений перемещений*

Анализируемый фактор выбирается из списка, установленного в разделах **Перемещения**, **Эпюры усилий, Поля напряжений** и **Постпроцессоры** (рис. 12.1-2).

Смена номера загружения или вида анализируемой информации может занимать определенное время, которое существенно зависит от размерности задачи.

Следует отметить, что условия работы конструкции могут привести к нулевым значениям некоторых факторов. Например, для ферменной системы в плоскости XOZ отсутствует перемещение по направлению оси Y.

Если значение фактора на всей расчетной схеме мало, то необходимо увеличить количество значащих цифр, используя страницу **Единицы измерений результатов** диалогового окна **Параметры**.

## Масштаб отображения

При отображении деформированного состояния схемы и эпюр усилий есть возможность изменить масштаб изображения перемещений или эпюр. Масштаб выбирается в списках **Коэффициент масштабирования перемещений** и **Коэффициент масштабирования эпюр**.

## Вывод маркеров, изолиний, изополей и изоповерхностей

Перемещения и силовые факторы для пластинчатых и объемных элементов могут выводиться в виде изолиний или изополей, а также цветовыми маркерами в узлах (для перемещений) и в центрах элементов (для усилий и напряжений). Кроме того, для объемных элементов предусмотрен вывод изоповерхностей. Выбор вида отображения выполняется кнопками, установленными в соответствующих разделах инструментальной панели:

 — вывод изополей;

 — вывод изополей и изолиний;

 — вывод изолиний;

 — вывод изолиний с заданным шагом;

 — вывод изоповерхностей;

 — вывод напряжений цветовыми маркерами;

 — вывод перемещений цветовыми маркерами;

 — вывод изополей с заданным шагом;

 — вывод изополей с выделенным значением.

Если на фоне эпюр, изолиний или изополей необходимо вывести еще и значения анализируемого фактора, то следует воспользоваться операцией  — **Оцифровка** (разд. 10). В результате выполнения этой операции на схеме отображаются следующие значения фактора: для эпюр усилий — максимальное значение (по абсолютной величине) усилия в элементе, для

перемещений — значение в узлах схемы, а для напряжений — значения в узлах и в центрах конечных элементов (в зависимости от настроек, выполненных в разделе **Настройка параметров среды** меню ***Настройки***). Для изменения шрифта, цвета и размеров цифр используется страница **Установка шрифтов** в многостраничном диалоговом окне **Параметры**.

Предусмотрена возможность отображения цифровых значений факторов только для выбранных (отмеченных) узлов и элементов (рис. 12.1-3). Для выбора таких объектов используется операция **Выбор объектов для отображения информации** на панели управления выбором. Признак вывода значений только для выбранных узлов и элементов может быть инициирован через панель фильтров (маркер **Отображать информацию на схеме только для выбранных элементов и узлов** на странице **Общие настройки фильтров отображения**) или активацией эквивалентной по действию операции на панели **Визуализация результатов**. Если одновременно нажать кнопки , на панели **Визуализация результатов** и кнопку на панели управления выбором, то каждое указание на схеме с отображением результатов расчета приведет к появлению численного значения анализируемого фактора выбранного объекта.

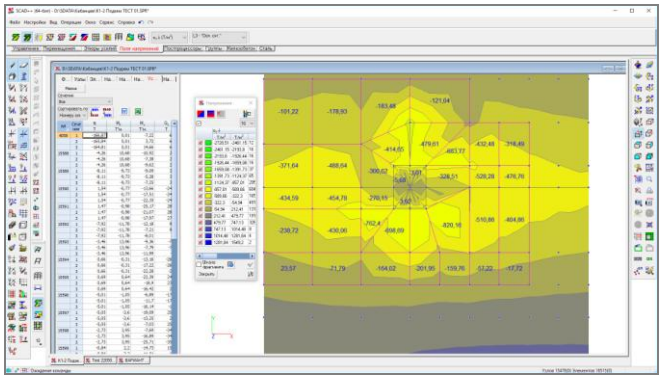


Рис. 12.1-3. *Выборочная оцифровка изополей*

## Вывод изолиний и изополей с заданным шагом исследуемого фактора



Операции реализуют вывод изополей и изолиний, при котором количество изолиний определяется в зависимости от заданного шага.

При этом положительные и отрицательные значения фактора отображаются на изолиниях и изополях двумя различными цветами (рис. 12.1-4), а диапазон значений одного знака от минимума до максимума представлен в виде полей (линий), которые отличаются интенсивностью выбранного цвета (градиентная шкала). Диапазоны значений фактора отображаются в цветовой шкале, показанной на рис. 12.1-5.

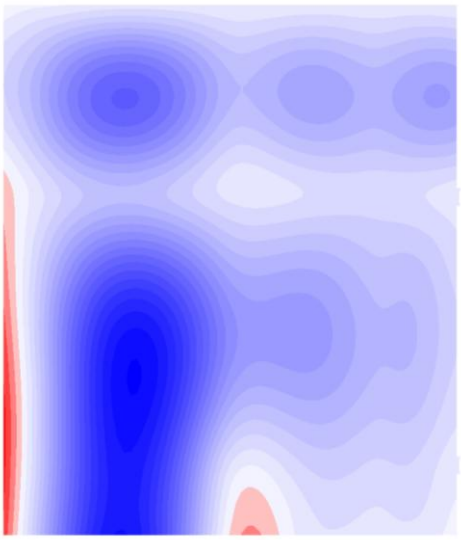


Рис. 12.1-4. *Отображение изополей на расчетной схеме*

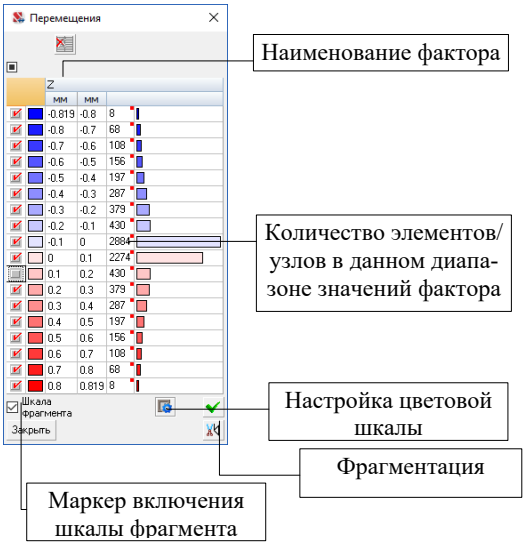



Рис. 12.1-5. *Цветовая шкала* **Перемещения**

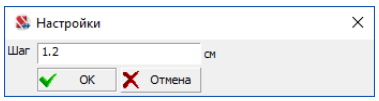



Рис. 12.1-6. *Диалоговое окно* **Настройки**

Шаг изолиний назначается в диалоговом окне **Настройки** (рис. 12.1-6). По умолчанию выбирается шаг, равный 1/10 максимального значения фактора. Вывод изолиний или изополей с новым шагом выполняется после выхода из диалогового окна по кнопке **OK**.

## Единицы измерения

При анализе перемещений и силовых факторов есть возможность изменить единицы измерения, например, отображать результаты перемещений не в метрах, а в дюймах или миллиметрах.

Для этого используется операция **Настройки** —  , которая вызывается из одноименного меню или из инструментальной панели раздела **Управления**. Назначение единиц измерения результатов расчета выполняется на одноименной странице диалогового окна **Параметры** (см. раздел 0) или с использованием такого инструмента как **Экспресс настройка единиц измерений** (см. раздел 35.2).

### Отображение расчетной схемы



На инструментальных панелях режима **Графический анализ результатов расчета** кнопка  **Отображение расчетной схемы** используется для «стирания» с текущего вида схемы графического представления результатов. В результате остается отображение только расчетной схемы или ее фрагмента. При этом будут отключены все активные операции визуализации результатов, например, цветовые шкалы.

## 12.2. Анализ перемещений

Анализ деформированного состояния схемы выполняется с помощью элементов управления, установленных в разделе **Перемещения** инструментальной панели (рис. 12.2-1).

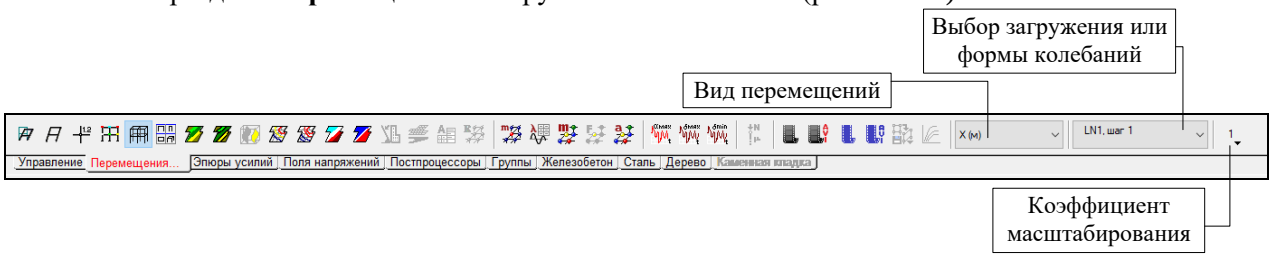



Рис. 12.2-1. *Инструментальная панель режима анализа перемещений*

Инструментальная панель режима **Перемещения** включает кнопки вызова следующих операций:

 — совместное отображение исходной и деформированной схем (рис. 12.2-2, *а*);

 — отображение деформированной схемы (рис. 12.2-2, *б*);

 — вывод значений перемещений в узлах;

 — цветовая индикация величины перемещений в узлах;

 — отображение расчетной схемы;

 — отображение на проекциях деформированной схемы на фоне исходной;

 — отображение изополей перемещений для пластинчатых элементов (рис. 12.2-2, *в*);

 — отображение изополей и изолиний перемещений для пластинчатых элементов;

 — отображение изоповерхностей перемещений для объемных элементов (рис. 12.2-2, *г*);

 — отображение изолиний с заданным шагом;

 — отображение изолиний перемещений для пластинчатых элементов;

 — отображение изополей с заданным шагом;

 — отображение изополей с выделенным значением;

 — вычисление крена конструкции;

 — вычисление крена фундаментной плиты;

 — работа внешних сил и суммарные нагрузки;

 — центры жесткости этажей;

 — определение координат центра масс;

 — частоты и периоды колебаний;

 — веса узловых масс;

 — динамические нагрузки по формам колебаний;

 — ускорения;

 — максимальные по всем моментам времени ускорения при прямом интегрировании уравнений движения;

 — минимальные по всем моментам времени перемещения при прямом интегрировании уравнений движения;

 — максимальные по всем моментам времени перемещения при прямом интегрировании уравнений движения;

 — свободные длины стержневых элементов;

 — анимация перемещений для статических и динамических загружений;

 — формирование видеоклипов перемещений для статических и динамических загружений;

 — анимация изменений состояния системы;

 — сохранение видео с анимацией изменений состояния системы;

 — сохранение деформированной схемы;

 — история по времени (см. раздел 15.4).

Кроме того, в инструментальной панели установлены три списка: **Вид перемещений**, **Выбор загружения** и **Коэффициент масштабирования перемещений**.

Результаты расчета перемещений в графической форме отображают в виде изополей, изолиний, изоповерхностей и маркеров линейных смещений и поворотов относительно осей общей системы координат, а также суммарных перемещений, вычисляемых как $\sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2}$.

При выводе деформированной схемы, формировании видеоклипов и анимации перемещений можно изменить масштаб отображения перемещений. Коэффициент масштабирования (рис. 12.2-1) выбирается из предлагаемого списка значений.

Анимацию  и формирование видеоклипов  можно выполнять для полной расчетной схемы или для ее фрагмента. Видеоклипы записываются в файл с расширением **.avi**. Эти файлы помещаются в каталог с файлами результатов или любой другой каталог и могут просматриваться с помощью стандартных средств визуализации видеоклипов Windows.

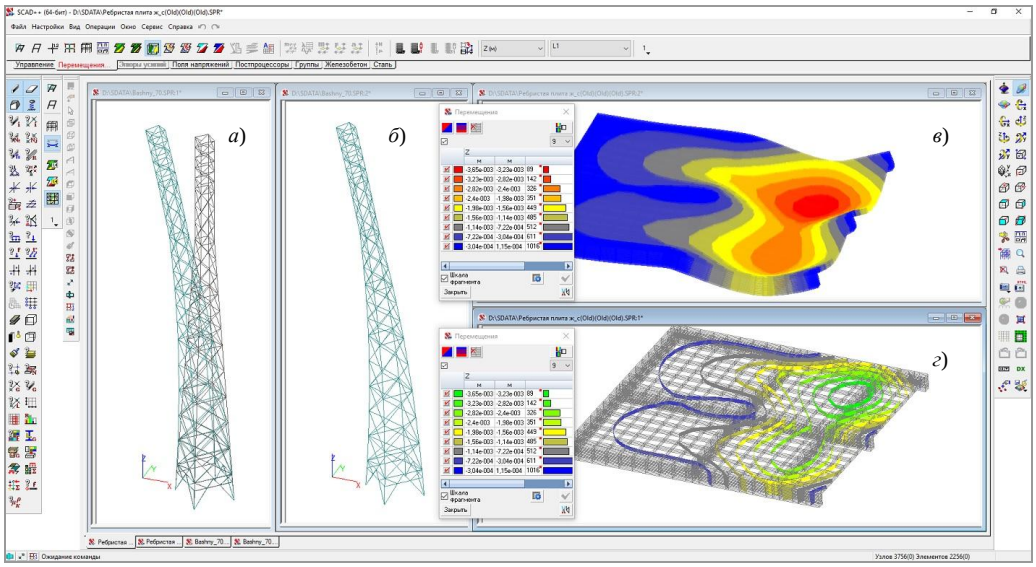



Рис. 12.2-2. *Отображение результатов расчета перемещений*
*а) деформированная схема на фоне исходной* *б) деформированная схема*
*в)изополя перемещений на деформированной схеме* *г) изоповерхности перемещений*

После завершения функции формирования видеоклипа появляется стандартное диалоговое окно **Сохранить как**, в котором задается имя файла. После записи файла открывается окно **Кино** (рис. 12.2-3), в котором можно просмотреть сформированный видеоклип. С помощью операции **Настройка параметров среды** в разделе меню ***Настройки*** можно изменить заданные по умолчанию параметры режима анимации, например, увеличить или уменьшить количество циклов повторения.

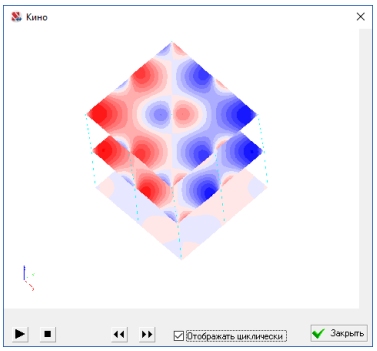



Рис. 12.2-3. *Диалоговое окно* **Кино**

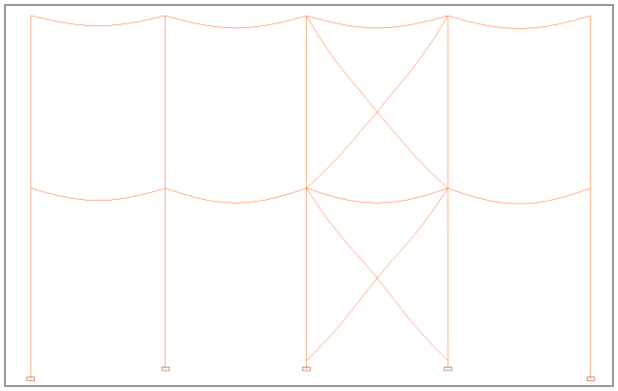


Рис. 12.2-4. *Деформированная схема при включенном фильтре отображения прогибов*

Для стержневых элементов предусмотрена возможность отображения деформированной схемы с учетом перемещений в промежуточных точках стержня (рис. 12.2-4). Для этого используется фильтр  — **Отображение прогибов в стержнях** (см. разд. 0). Если этот фильтр активен, то функция анимации также выполняется с визуализацией прогибов. Для анализа прогибов в одном элементе можно воспользоваться операцией **Эпюры прогибов** в диалоговом окне **Информация об элементе** (разд. 10.2).

## Анимация шаговых и временных процессов



Эти операции позволяют анимировать процессы изменения состояния модели на заданном временном интервале (прямое интегрирование уравнений движения), на заданном участке шагового процесса (нелинейные задачи) или при смене стадий монтажа (для накапливаемого загружения). В случае прямого интегрирования принято, что изменения состояния анализируются на всем

временном интервале. Для шагового процесса, кроме анализа на всем интервале шагов, предусмотрена возможность указать подмножество шагов, соответствующих догрузке выбранными линейными загружениями.

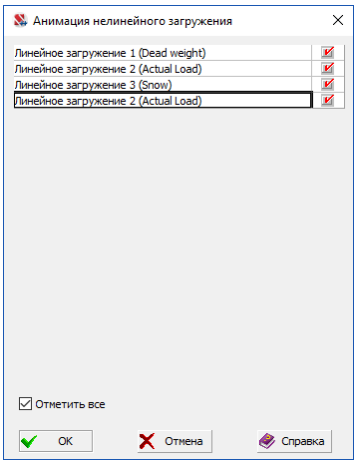



Рис. 12.2-5. *Диалоговое окно* **Анимация нелинейного загружения**

В случае нелинейных загружений при активации операции **Анимация** появляется диалоговое окно **Анимация нелинейного загружения** (рис. 12.2-5) с перечнем загружений, используемых при моделировании нелинейных нагрузок (заданных для данного нелинейного загружения в диалоговом окне **Управление шаговым процессом**). Маркерами, стоящими справа от наименования загружений, следует отметить загружения, набор шагов которых будет учитываться в процессе анимации.

Если анимация выполняется на фоне визуализации цветовой шкалы, то при смене шага нелинейного процесса или времени (в случае прямого интегрирования) будут меняться минимаксные значения. Поэтому при анимации из настроек цветовой шкалы будут "унаследованы" только число и цвета диапазонов, шаг (для шкал с постоянным шагом), разделитель и исключаемый диапазон для шкал с выделенным значением. Границы изображения (позиция сдвига относительно окна) не меняются.

## Определение координат центра масс



Эта операция позволяет для каждого динамического загружения определить координаты X, Y и Z точки, в которой расположен центр заданных масс. После активации операции на экране появляется диалоговое окно **Определение центра масс** (рис. 12.2-6), в котором приводится таблица со списком динамических загружений и координатами центра масс.

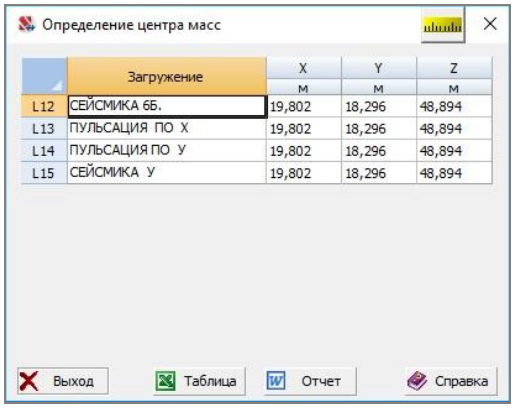



Рис. 12.2-6. *Диалоговое окно* **Определение центра масс**

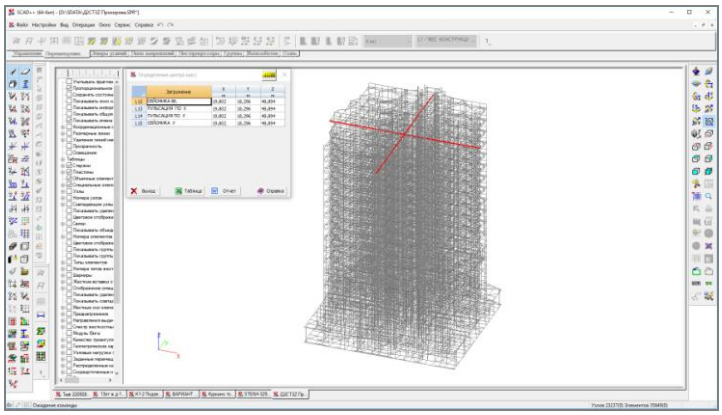


Рис. 12.2-7. *Расчетная схема с отображением центра масс*

Если указать курсором на строку с наименованием загружения, то на расчетной схеме отображаются две прямые, на пересечении которых лежит центр масс данного загружения (рис. 12.2-7). При определении центра масс учитываются как заданные массы, так и массы, полученные путем преобразования статических нагрузок.

Если имеются селектированные узлы и/или элементы, то при активации данной операции появляется выпадающее меню, в котором можно выбрать один из вариантов:

- определение центра масс модели;
- определение центра масс выбранных узлов;
- определение центра масс выбранных элементов.

В последнем случае будет определен центр масс всех узлов, которые принадлежат выбранным элементам.

## Вычисление крена конструкции



Для определения крена конструкции необходимо назначить группу или группы узлов, перемещения которых обуславливают величину крена. После активации операции появляется диалоговое окно **Определение крена конструкции** (рис. 12.2-8).

Из списка **Группы узлов** этого окна следует выбрать имя группы, после чего в таблице для каждого загружения появится величина крена.

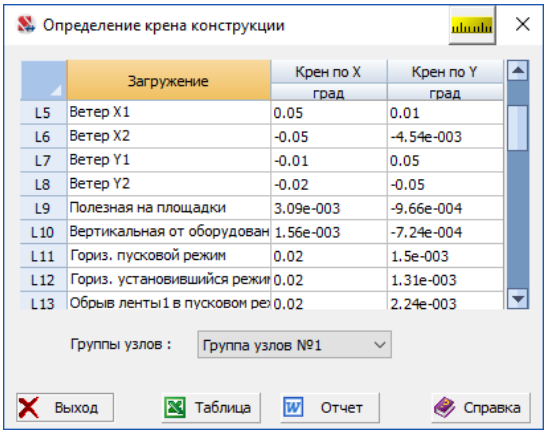



Рис. 12.2-8. *Диалоговое окно* **Определение крена конструкции**

Вычисление крена выполняется по следующему алгоритму:

- для выбранной группы узлов определяется прямая, которая наилучшим образом аппроксимирует положение узлов группы в их исходных координатах;
- для этой же группы аналогичная операция выполняется с учетом перемещений узлов в каждом из загружений;
- углы между проекциями найденных прямых на плоскости XOZ, YOZ являются креном по X и креном по Y.

Кнопки **Отчет** и **Таблица** позволяют получить отчетный документ в формате MS Word или MS Excel соответственно.

## Вычисление крена фундаментной плиты



Для определения крена фундамента необходимо назначить группу или группы узлов, перемещения которых обуславливают величину крена.

После активации операции появляется диалоговое окно (рис. 12.2-9) **Определение крена фундаментной плиты**. Из списка **Группы узлов** этого окна следует выбрать имя группы, после чего в таблице для каждого загружения появится значение величины крена.

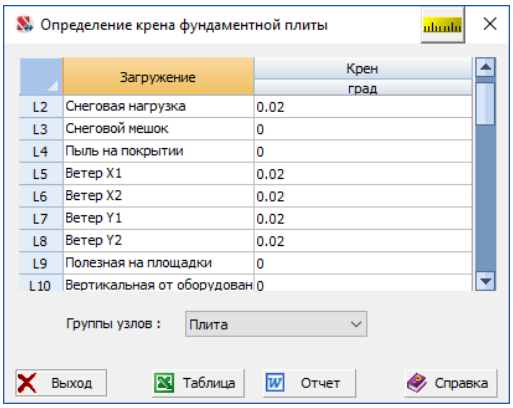



Рис. 12.2-9. *Диалоговое окно* **Определение крена фундаментной плиты**

Вычисление крена выполняется по следующему алгоритму:

- для выбранной группы узлов определяется плоскость, которая наилучшим образом аппроксимирует положение узлов группы в их исходных координатах;
- для этой же группы аналогичная операция выполняется с учетом перемещений узлов в каждом из загружений;
- угол между найденными плоскостями является креном.

Кнопки **Отчет** и **Таблица** позволяют получить отчетный документ в формате MS Word или MS Excel соответственно.

## Частоты и периоды колебаний



Операция позволяет получить таблицу со списком характеристик динамических загружений. В результате ее выполнения в диалоговом окне **Периоды и частоты колебаний** (рис. 12.2-10) выводится таблица, в которой для всех динамических загружений и для каждой заказанной в исходных данных формы колебаний выдаются собственные значения, частоты, периоды колебаний и проценты модальных масс (с учетом закреплений).

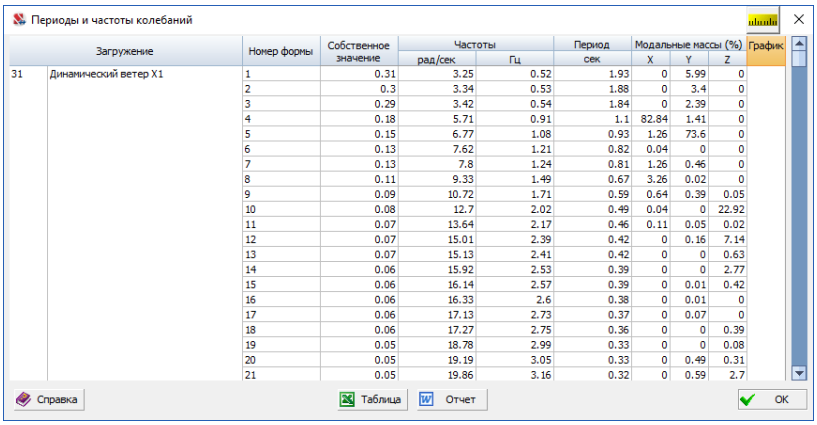



Рис. 12.2-10. *Диалоговое окно* **Периоды и частоты колебаний**

Кроме того, в таблицу выводятся модальные коэффициенты участия для каждой формы колебаний. Для сейсмических загружений кнопка **Матрицы инерции** позволяет увидеть матрицы инерционных характеристик модели как жёсткого целого (с учетом и без учета закреплений), которые используются в некоторых моделях[1] взаимодействия сооружений с грунтовым основанием.

Кнопки **Таблица** и **Отчет** позволяют соответственно экспортировать таблицу в программу MS Excel или сформировать RTF – файл, загрузив его в ассоциированную программу.

[1] См., например, А.Г.Тяпин, *Расчет сооружений на сейсмические воздействия с учетом взаимодействия с грунтовым основанием*, М., Изд-во АСВ, 2013.

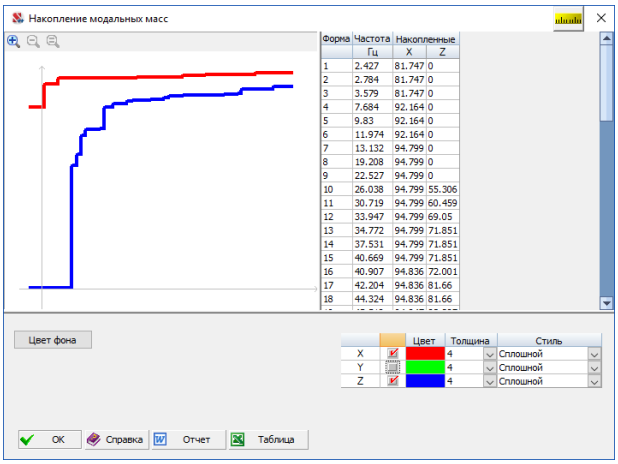



Рис. 12.2-11. *Диалоговое окно* **Накопление модальных масс**

Если вычислено более одной формы колебаний, то в таблице появляется кнопка **График**, которая позволяет получить график накопления процента модальных масс по различным направлениям (рис. 12.2-11).

## Веса узловых масс



Операция используется для отображения в виде цветовых маркеров весов узловых масс на расчетной схеме. В результате ее выполнения выводится цветовая шкала весов узловых масс (рис. 12.2-12), заданных пользователем и полученных автоматически путем преобразования статических нагрузок в массы.

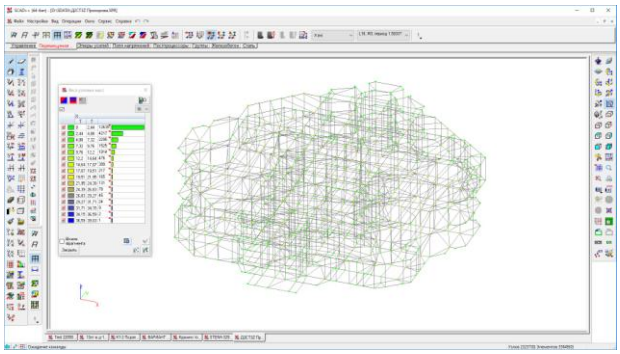


Рис. 12.2-12. *Распределение узловых масс*

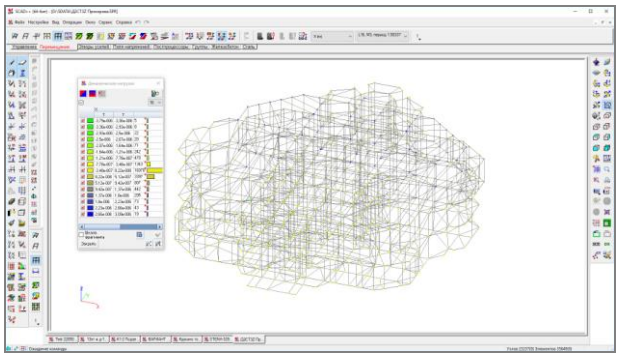


Рис. 12.2-13. *Распределение динамических сил*

## Динамические нагрузки по формам колебаний



Операция используется для отображения в виде цветовых маркеров распределения динамических нагрузок на расчетной схеме. В результате ее выполнения выводится цветовая шкала динамических нагрузок для каждой формы колебаний (рис. 12.2-13).

## Ускорения

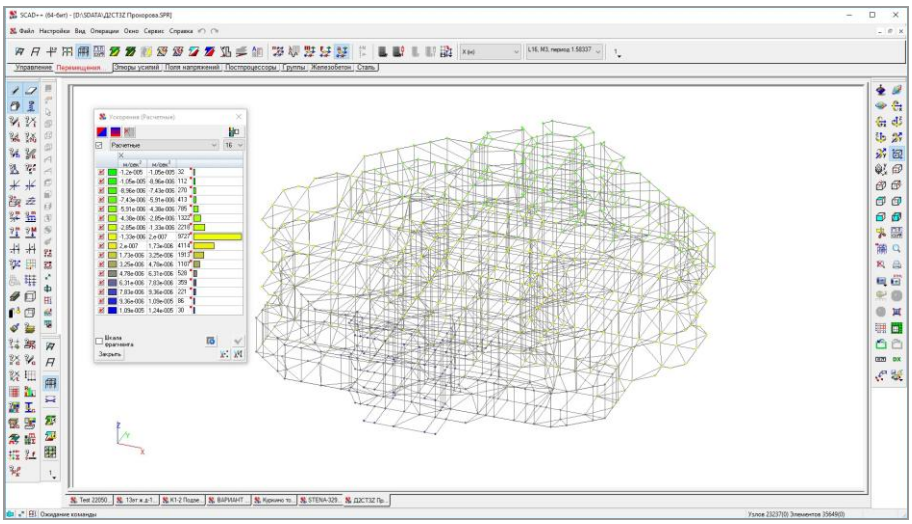


Рис. 12.2-14. *Ускорения в узлах*

Операция  используется для отображения в виде цветовых маркеров ускорений, полученных в результате расчета, в узлах расчетной схемы для каждой формы колебаний и для суммарной динамической нагрузки (рис. 12.2-14). В диалоговом окне управления шкалой в выпадающем списке можно выбрать тип выводимых значений (расчетные или нормативные). Кроме того, при расчете пульсационной составляющей ветровой нагрузки по СП 20.13330 в этом списке присутствует пункт **Динамическая комфортность**, выбор которого позволяет анализировать величины, равные 70% от нормативных ускорений (ограничения именно этих величин оговорены в СП 20.13330).

В том случае, когда анализируются результаты прямого интегрирования уравнений движения, операция  позволяет получить цветовую шкалу максимальных (по абсолютной величине) значений ускорения по всем моментам времени по выбранному направлению (X,Y,Z, горизонтальные или суммарные).

## Свободные длины стержневых элементов



Операция используется для отображения в виде цветовой шкалы свободных длин стержневых элементов.

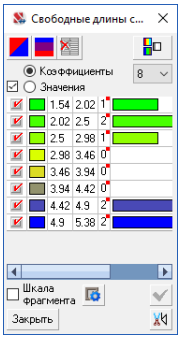



Рис. 12.2-15. *Свободные длины стержней*

Диалоговое окно цветовой шкалы (рис. 12.2-15) позволяет выбрать нужную плоскость инерции стержня ($X_1OZ_1$ или $X_1OY_1$), а также форму представления — значения свободных длин или коэффициенты свободной длины (отношение свободной длины к длине гибкой части).

## Сохранение деформированной схемы



Операция используется для формирования новой расчетной схемы, на основе деформированной схемы, полученной от активного (рассматриваемого) загружения.

В результате выполнения операции появляется выпадающее меню, в котором предлагается создать деформированную схему или деформированную схему с преднапряжением. Координаты узлов новой схемы формируются по правилу $X_i + \Delta X_i$, $Y_i + \Delta Y_i$, $Z_i + \Delta Z_i$.

Сохранение результатов расчета в виде скорректированной расчетной схемы объекта возможно в следующих формах:

a) сохранение деформированной схемы, в которой координаты узлов корректируются путем добавления перемещений, полученных в расчете;

b) сохранение внутренних усилий и деформированной схемы;

c) сохранение внутренних усилий.

Вариант «a» особенно полезен при проектировании висячих систем, когда ведется поиск геометрии конструкции. Тогда отталкиваясь от некоторой исходной геометрии ненапряженной системы и сохраняя ее деформированную схему, полученную в нелинейном расчете, можно получить геометрический образ, который будет иметь система под действием, например, собственного веса.

Вариант «b» позволяет сохранить деформированную схему и внутренние усилия, что необходимо при проектировании предварительно напряженных конструкций. Чаще всего при этом запоминаются результаты расчета системы, подверженной температурным или другим кинематическим воздействиям.

Если выбрана форма колебаний, которой соответствуют динамические нагрузки, то в меню можно выбрать третий пункт *Сохранить динамические нагрузки как группу нагрузок*. В дальнейшем можно использовать эту группу нагрузок для формирования статических загружений и провести, например, анализ устойчивости при действии выбранной формы колебаний (при этом не следует забывать о знакопеременности формы колебаний).

Если рассматривается расчетная схема каркасного здания и выбрана первая форма потери устойчивости, то данная операция позволяет сохранить деформированную схему для учета начальных несовершенств в соответствии с рекомендациями Eurocode 3 (см. ниже).

Последний пункт меню *Сохранить веса узловых масс как группы нагрузок* позволяет для каждого динамического загружения создать группу узловых нагрузок, которые соответствуют весам узловых масс.

## Учет начальных несовершенств

В соответствии с рекомендациями Еврокода (EN 1993) при выборе конфигурации расчетной схемы, учитывающей начальные несовершенства, может быть принята деформированная схема, соответствующая первой форме потери устойчивости (при минимальных значениях упругой критической нагрузки). Нормирующий множитель, который указывает величину максимально возможного смещения узла, может быть задан пользователем. Если нормировка выполняется в соответствии с рекомендациями EN 1993, то величина максимального смещения ($\Delta$) вычисляется по формуле

$$\Delta = \frac{H}{200}\sqrt{0.5\left(1+\frac{1}{m}\right)},$$

где H — высота здания, m — число сжатых колон на этаже.

Формирование расчетной схемы с учетом начальных несовершенств активируется в разделе **Перемещения** инструментальной панели. Запись схемы на диск выполняется по правилам, аналогичным записи деформированной схемы, с помощью одноименной операции. Для получения расчетной схемы с учетом начальных несовершенств следует:

- Выполнить расчет устойчивости с определением первой формы потери устойчивости;
- Перейти в режим графического анализа результатов расчета;

- В списке **Выбор загружения** инструментальной панели **Перемещения** выбрать строку с результатами расчета первой формы потери устойчивости;
- Активировать операцию **Сохранение деформированной схемы**, после чего появляется диалоговое окно **Задание начальных несовершенств по форме потери устойчивости** (рис. 12.2-16);
- В поле **Максимальное смещение узлов по форме потери устойчивости** задать абсолютное значение максимального смещения узла;
- Если расчет выполняется с учетом рекомендаций **Еврокода 3**, то величину максимального смещения по вышеприведенной формуле можно вычислить автоматически (кнопка **Вычислить** с пиктограммой флага ЕС);
- После активации операции **Вычислить** в диалоговом окне **Вычисление максимального смещения** (рис. 12.2-17) следует задать высоту здания и количество сжатых колонн в подвале или на первом этаже (по умолчанию берутся значения из расчетной схемы);
- Выйти из окна нажатием кнопки **OK**;
- В поле **Максимальное смещение …** (рис. 12.2-16) будет показано значение смещения, которое рассматривается в качестве максимального при учете начальных несовершенств для данной схемы;
- Выход из окна (рис. 12.2-16) по кнопке **OK** открывает стандартное диалоговое окно **Сохранить как…,** в котором задается имя файла и выполняется запись на диск расчетной схемы, в которой координаты узлов модифицированы с учетом начальных несовершенств.

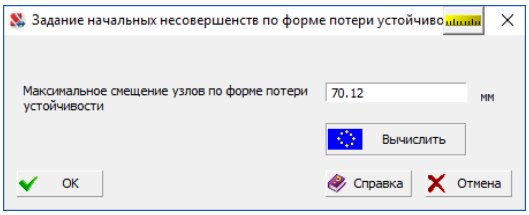



Рис. 12.2-16. *Диалоговое окно* **Максимальное смещение узлов по форме потери устойчивости**

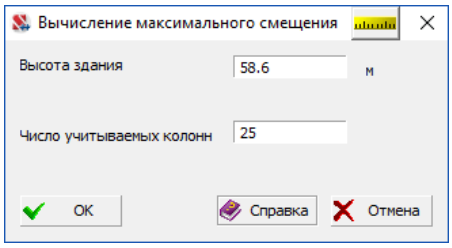



Рис. 12.2-17. *Диалоговое окно* **Вычисление максимального смещения**

## Специальная обработка при выдаче результатов перемещений

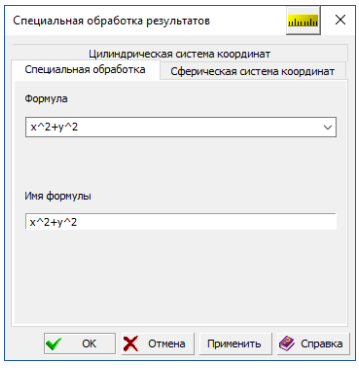



Рис. 12.2-18. *Диалоговое окно* **Специальная обработка результатов** (перемещения по заданной формуле)

Результаты перемещений могут быть выданы в виде цветовых маркеров, изополей и изолиний по специальным правилам, которые включают возможность получения результатов по заданной формуле, в цилиндрической или сферической системах координат. Правила вывода назначаются в многостраничном диалоговом окне **Специальная обработка результатов**, которое вызывается выбором раздела **По формуле** из списка направлений перемещений.

На странице **Специальная обработка результатов** (рис. 12.2-18) может быть задана формула $R = f(x, y, z)$, по которой следует обрабатывать результаты расчета перемещений (переменные $x,y,z$ интерпретируются как перемещения в соответствующих направлениях). Введенная формула запоминается, и при дальнейшем обращении к программе может быть использована в этой и других

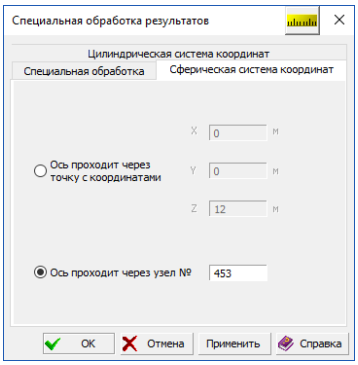



Рис. 12.2-19. *Диалоговое окно* **Специальная обработка результатов** (перемещения в сферической системе координат)

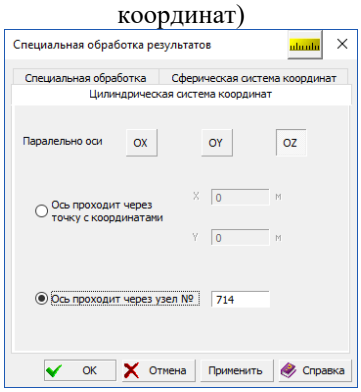



Рис. 12.2-20. *Диалоговое окно* **Специальная обработка результатов** (перемещения в цилиндрической системе координат)

задачах. При вводе формулы ей может быть дано наименование. Для ввода формулы следует записать в поле списка **Формула** нужное выражение, а в поле **Имя формулы** — ее наименование. После выхода из окна (кнопка **ОК**) и выбора вида отображения результаты будут отображаться на схеме. Для последующего использования введенной формулы достаточно ее выбрать из списка.

Для отображения результатов в сферической системе координат следует задать на одноименной странице (рис. 12.2-19) координаты центра, относительно которого строятся перемещения (маркер **Центр в точке с координатами**) или указать номер узла, в котором лежит центр (маркер **Центр в узле №**).

При выводе результатов в цилиндрической системе координат на одноименной странице (рис. 12.2-20) следует указать, параллельно какой оси общей системы координат проходит ось выдачи (кнопки **Параллельно оси**), а также точку или узел, через который проходит ось выдачи (маркеры **Ось проходит через точку с координатами** и **Ось проходит через узел**).

После выхода из окна (кнопка **ОК**) и выбора вида отображения результаты будут отображены на схеме.

## 12.3. Анализ усилий в стержнях

Анализ усилий в стержнях выполняется с помощью элементов управления, установленных в разделе **Эпюры усилий** инструментальной панели (рис. 12.3-1).

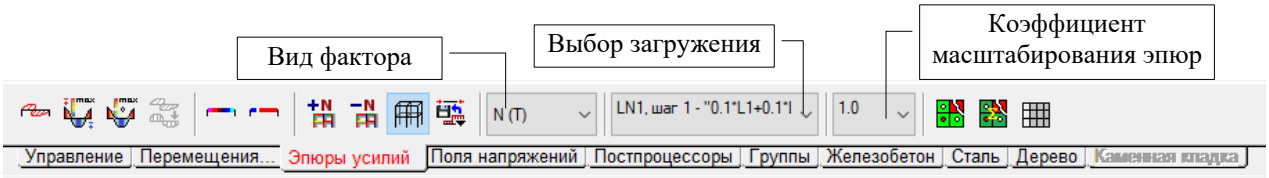



Рис. 12.3-1. *Инструментальная панель в режиме анализа усилий в стержневых элементах*

В этом режиме предусмотрены следующие операции отображения результатов:

 — вывод эпюр усилий;

 — цветовое отображение эпюр усилий;

 — цветовое отображение эпюр усилий с выделенным значением;

 — смена оси отображения эпюр $N$ и $M_k$;

 — цветовое отображение значений усилий;

 — цветовое отображение значений усилий с выделенным значением;

 — цветовая индикация максимальных положительных значений установленного фактора;

 — цветовая индикация максимальных отрицательных значений установленного фактора;

 — отображение исходного состояния схемы;

 — сохранение схемы с преднапряжениями;

 — цветовое отображение повреждений и разрушений (при физически нелинейном расчете);

 — цветовое отображение суммарных повреждений и разрушений (при физически нелинейном расчете);

 — табличное отображение суммарных повреждений и разрушений (при физически нелинейном расчете).

Кроме того, в инструментальной панели установлены три списка: выбор силового фактора, назначение номера загружения и установка коэффициента масштабирования эпюр.

При выводе эпюр можно изменить масштаб их отображения. Масштаб изменяется в соответствии со значением коэффициента, выбранного из предлагаемого списка значений.

Дл

я анализа эпюр всех силовых факторов одного элемента следует воспользоваться кнопкой **Эпюры усилий** в диалоговом окне **Информация об элементе** (см. раздел 10.2).

Эпюры усилий могут быть заштрихованы. Активация и управление операцией штриховки выполняются на странице **Результаты** диалогового окна **Настройка параметров среды** (рис. 12.3-4), которое вызывается из одноименного пункта в разделе меню ***Настройки***. Если шаг между линиями штриховки (**Шаг штриховки эпюр усилий**) задан равным единице, это соответствует максимальной плотности штриховки. При значениях шага 1.5 или 2 плотность штриховки, соответственно, уменьшается в полтора или два раза.

На рис. 12.3-2,а приводится пример отображения эпюр на расчетной схеме при активной опции **Штриховать эпюры усилий**.

Для отображения максимальных (по абсолютной величине) числовых значений исследуемого фактора используется кнопка фильтров  .

При цветовой индикации значений силовых факторов (кнопка  — для индикации положительных значений и  — для отрицательных) элементы окрашиваются в цвет, соответствующий максимальному значению фактора в элементе. Для индикации значений нормальных сил можно пользоваться любой кнопкой, т.к. окраска элементов схемы и шкала будут одновременно включать как положительные, так и отрицательные значения. Если при использовании рассматриваемых операций включить фильтр отображения профилей стержневых элементов с учетом удаления линий невидимого контура, то визуализация профиля будет выполняться с учетом цветовой шкалы (рис. 12.3-3).

Операция **Цветовое отображение значений усилий** —  обеспечивает градиентную окраску каждого элемента (рис. 12.3-2,б) в зависимости от изменения значения исследуемого фактора вдоль элемента. Эта операция не учитывает факт включения фильтра отображения профилей стержневых элементов с учетом удаления линий невидимого контура.

При использовании операции **Цветовое отображение значений усилий с выделенным значением** —  элементы схемы окрашиваются в оттенки двух цветов. В один из цветов окрашиваются элементы или их часть, у которых значение фактора лежит выше выделенного значения, а в другой цвет — со значением фактора, лежащим ниже этого значения. Интенсивность цветов ослабевает по мере приближения к выделенному значению. Элементы, у которых значение силового фактора находится внутри диапазона выделенного значения, окрашиваются в третий цвет (рис. 12.3-2,в). Диапазон выделенного значения задается в диалоговом окне **Настройки**, которое вызывается из окна шкалы кнопкой **Настройка цветовой шкалы** (рис. 12.3-4).

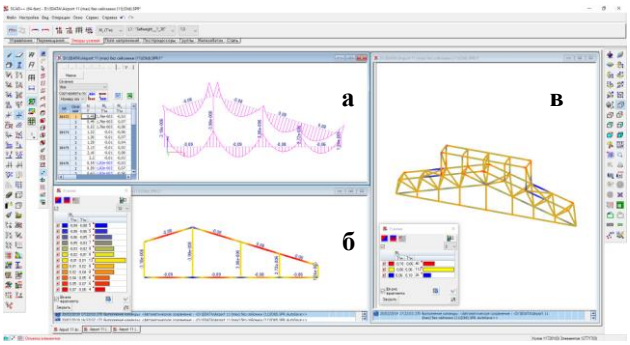



Рис. 12.3-2. *Отображение усилий на расчетной схеме*

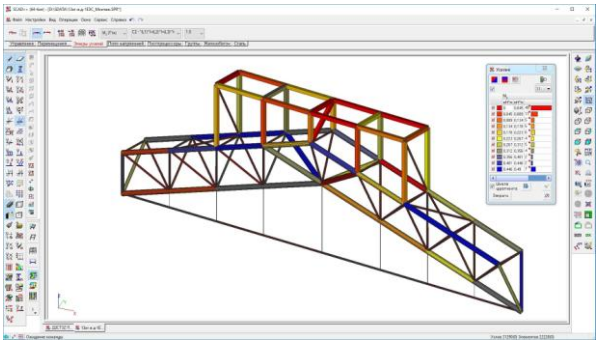


Рис. 12.3-3. *Цветовая шкала усилий на схеме с визуализацией профилей стержней*

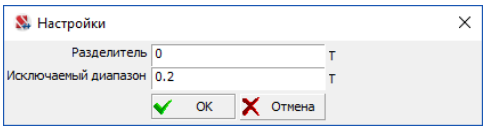



Рис. 12.3-4. *Диалоговое окно* **Настройки**

В окне настройки задаются два значения: **Разделитель** — значение фактора, определяющее середину выделенного диапазона, и **Исключаемый диапазон** — значение фактора, характеризующее ширину диапазона. Например, если разделитель задан равным 1, а выделенный диапазон равным 0.2, то значения фактора, попадающие в выделенный диапазон, будут лежать от +1.2 до -1.2.

Операции  (**Цветовое отображение эпюр усилий**) и  (**Цветовое отображение эпюр усилий с выделенным значением**) аналогичны операциям  ,  , но они обеспечивает градиентную окраску *эпюр* усилий:



## 12.4. Анализ усилий и напряжений в пластинчатых элементах

### Управление отображением усилий и напряжений

Анализ силовых факторов в пластинчатых и объемных элементах выполняется с помощью операций раздела **Поля напряжений** инструментальной панели (рис. 12.4-1).

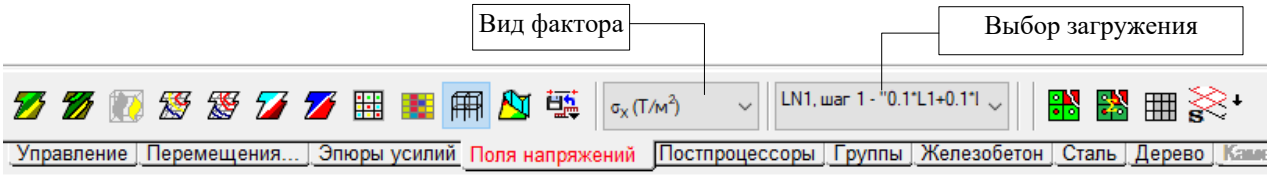



Рис. 12.4-1. *Инструментальная панель в режиме анализа напряжений в пластинах*

Инструментальная панель режима включает следующие операции отображения результатов:

 — отображение изополей усилий и напряжений для пластинчатых элементов;

 — отображение изополей и изолиний усилий и напряжений для пластинчатых элементов;

 — отображение изоповерхностей напряжений для объемных элементов;

 — отображение изолиний усилий и напряжений для пластинчатых элементов;

 — отображение изолиний с заданным шагом;

 — отображение изополей с заданным шагом;

 — отображение изополей с выделенным значением;

 — отображение напряжений цветовыми маркерами;

 — цветовая индикация напряжений в центре элементов;

 — отображение расчетной схемы;

 — построение эпюр напряжений вдоль секущей;

 — сохранение схемы с преднапряжениями;

 — цветовое отображение повреждений и разрушений (при физически нелинейном расчете);

 — цветовое отображение суммарных повреждений и разрушений (при физически нелинейном расчете);

 — табличное отображение суммарных повреждений и разрушений (при физически нелинейном расчете).

 — определение площади отмеченных или видимых пластин.

Кроме того, в инструментальной панели установлены два списка для выбора наименования силового фактора и номера загружения (рис. 12.4-1). Если в расчетной схеме есть многослойные конечные элементы, то в инструментальной панели появляется еще один выпадающий список для выбора номера слоя, напряжения в котором подлежат визуализации.

Для отображения числовых значений силового фактора на изополях и изолиниях используется кнопка фильтров  . Значения могут выводиться в центрах элементов и в узлах. Для получения значений в узлах необходимо активировать соответствующую опцию в диалоговом окне **Настройка параметров среды** (вызывается из одноименного пункта в разделе меню ***Настройки***).

Вывод изолиний и изополей выполняется по тем же правилам, что и при анализе перемещений в пластинчатых элементах (рис. 12.4-2).

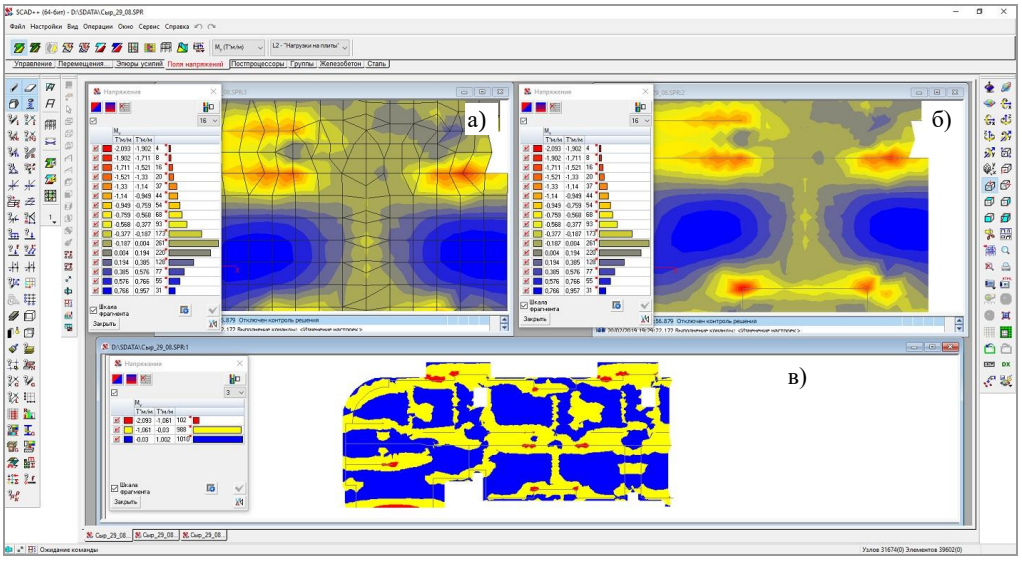



Рис. 12.4-2. *Отображение изополей и изолиний напряжений на расчетной схеме*
*а) с отображением сетки КЭ; б) без отображения сетки КЭ; в) с выделенным значением*

При анализе числовых значений силовых факторов, приведенных в цветовой шкале изополей и изолиний, следует учитывать, что их величины по умолчанию даны с учетом усредненных значений в узлах от всех приходящих в данный узел элементов. Кроме того, в зависимости от настройки фильтра оцифровки изолиний и изополей (см. рис. 12.4-8), эти значения могут базироваться на минимальном или максимальном значениях фактора в узле, а также показывать невязку. Отметим, что в информации об элементе значения силовых факторов в узлах рассматриваемого элемента приведены без усреднения и могут отличаться от значений на изополях.

Формирование расчетных сочетаний усилий выполняется на основе значений факторов, полученных в центрах элементов. Для того чтобы оценить именно эти значения, следует использовать режим отображения с помощью цветовых маркеров —  . Кроме того, в этом режиме не выполняется удаление линий невидимого контура, что позволяет более точно определить точки расчетной модели с экстремальными значениями факторов.

В программе предусмотрено построение изолиний и изополей напряжений для верхней и нижней граней плоскостных элементов. В списке силовых факторов раздела **Поля напряжений** эти напряжения обозначены как:

$\sigma_{x\downarrow}$, $\sigma_{y\downarrow}$ — напряжения на нижней грани элементов по направлениям $X_1$ и $Y_1$ соответственно;

$\sigma_{x\uparrow}$, $\sigma_{y\uparrow}$ — напряжения на верхней грани элементов по направлениям $X_1$ и $Y_1$ соответственно.

## Выборочная маркировка силовых факторов



При отображении результатов расчета силовых факторов в пластинчатых элементах предусмотрена возможность их выборочной оцифровки (см. раздел 12.1).

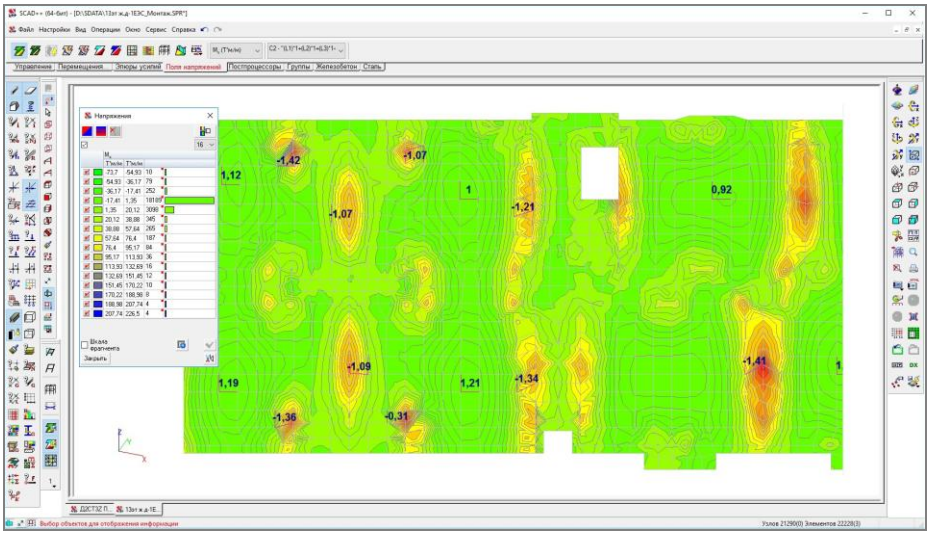



Рис. 12.4-3. *Пример выборочной оцифровки силовых факторов*

## Построение эпюр напряжений



Эта операция предназначена для построения эпюр силовых факторов вдоль заданной линии (секущей) в элементах оболочки, плиты и балки-стенки.

После активации операции следует провести секущую через интересующий участок схемы, после чего открывается диалоговое окно **Напряжения** (рис. 12.4-4). Элементы управления этого окна включают:

- список силовых факторов, из которого выбирается наименование фактора;
- кнопки  и  для переключения направления отображения эпюры в зависимости от знака (положительные значения факторов показаны на эпюрах красным цветом);
- **Масштаб** — регулятор масштабирования эпюры;
- **Шаг** — регулятор шага штриховки эпюр (относительное расстояние между линиями штриховки);
- **Убрать точки** — удаление выносок со значениями фактора на отображении эпюры;
- кнопка **Сохранить изображение в виде файла wmf** — для сохранения эпюр в формате Windows-метафайла (расширение **.wmf**) ;
- эпюры будут строиться в сечении схемы, которое образовано плоскостью, проходящей вдоль секущей перпендикулярно плоскости экрана.

Следует учитывать следующие особенности построения эпюр:

- независимо от длины секущей, эпюры будут строиться на всех участках схемы (фрагмента), попавших в секущую плоскость;
- для стержней, попавших в секущую плоскость, эпюры не строятся.

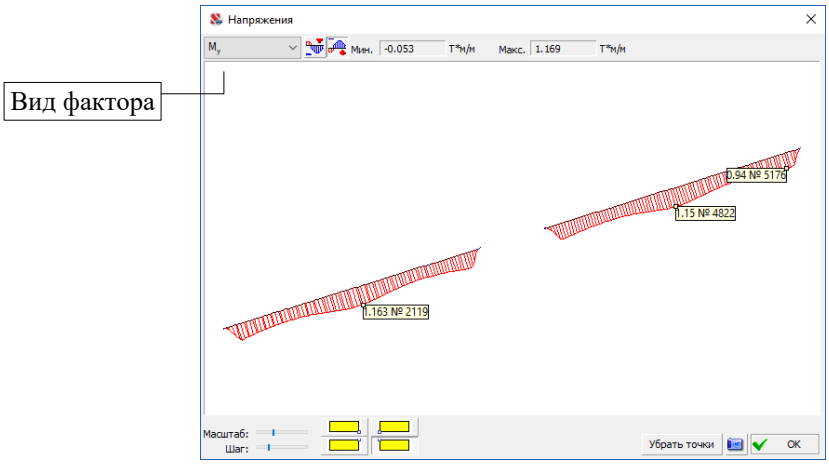



Рис. 12.4-4. *Диалоговое окно* **Напряжения**

Для вывода на эпюре значений анализируемого фактора достаточно указать курсором точку на эпюре и нажать левую кнопку мыши. Для удаления выноски со значением фактора следует повторно указать курсором на ту же точку.

## Изополя усилий в пластинах

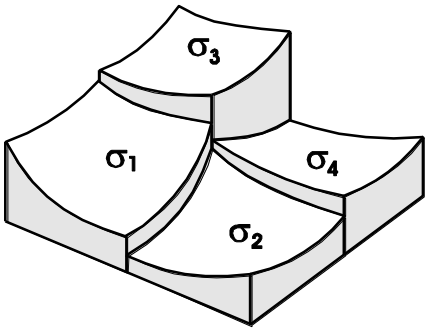



Рис. 12.4-5. *Разрывное поле напряжений*

При использовании конечно-элементного подхода в перемещениях вычисление напряжений связано с рядом проблем. Локальный поэлементный подсчет напряжений приводит к полям напряжений, имеющим разрывы на межэлементных границах (рис. 12.4-5). Для получения узловых напряжений в этих случаях прибегают к тому или иному методу усреднения вкладов напряжений отдельных элементов в их общий узел (усреднение по звезде элементов узла).

В программе предусмотрено, что для каждого из конечных элементов эти усилия вычисляются в серединах (в центре тяжести) и в точках примыкания к узлам расчетной схемы.

Затем для узла вычисляется среднее арифметическое значение указанных усилий по точкам примыкания всех элементов, сходящихся в узле и определяющих рассматриваемое усилие, при условии, что такие элементы расположены примерно в одной плоскости. Само понятие «примерно в одной плоскости» регулируется значением «параметра пологости», который по умолчанию принимается равным 0,95 (это есть косинус угла между нормалями к смежным элементам, равного примерно 18°), но может быть заменено пользователем.

Именно по указанным среднеарифметическим значениям строятся изополя или изолинии, эти же значения выдаются на экран при соответствующей настройке режима выдачи результатов.

По поводу сказанного следует заметить, что осреднение имеет смысл для так называемых регулярных узлов, где не следует ожидать скачкообразного изменения усилий. Тогда оно дает значение, приближающееся к ожидаемому «плавному» решению (рис. 12.4-6, *а*). Для тех случаев, когда в узле ожидается появление скачка значений внутренних усилий (рис. 12.4-6, *б*), осреднение значений такой скачок сглаживает, что может привести к недоразумениям.

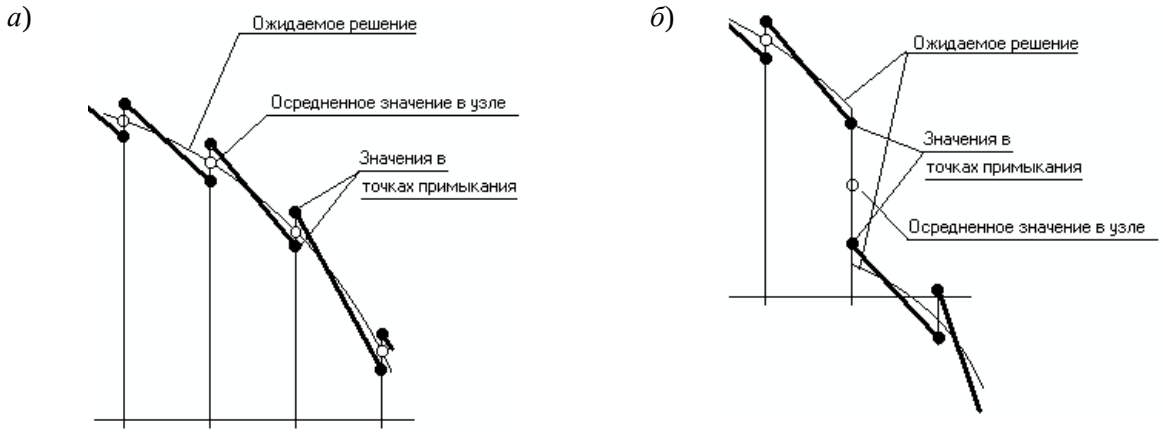



Рис. 12.4-6. *Иллюстрация поведения конечно-элементного решения: а — гладкий случай; б — разрывное решение*

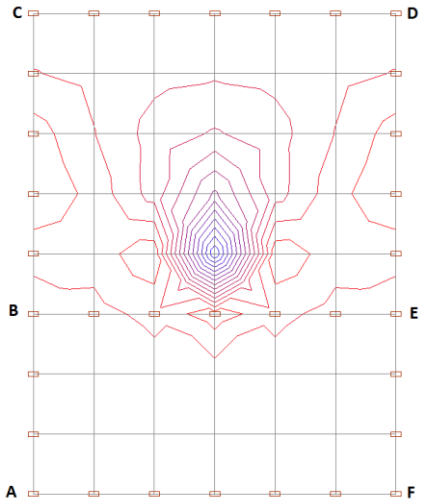



Рис. 12.4-7. *Ошибка за счет осреднения*

Следовательно, в тех случаях, когда в узле приложено сосредоточенное воздействие, или же там наложена связь, или, наконец, в районе узла происходит скачкообразное изменение жесткости, к выдаваемым узловым значениям следует отнестись с осторожностью. Например, в прямоугольной пластинке, полностью защемленной по контуру ABCDEF и по некоторой внутренней линии BE, которая нагружена в прямоугольнике BCDE, не должно быть моментов на ABEF. Но за счет осреднения моментов на линии BE возникает картина, представленная на рисунке 12.4-7.

В упомянутых случаях можно проверить себя выдачей подробных данных о напряженно-деформированном состоянии элементов, т. е. при настройке параметров графической среды назначить вывод значений силовых факторов в узлах пластин.

Описанная выше процедура осреднения используется по умолчанию. Но программа предоставляет и другие возможности. Если нажать правую клавишу мыши на кнопке  , то появится многостраничное диалоговое окно **Настройка фильтров отображения информации**. На странице **Оцифровка** (см. рис. 12.4-8) в группе *Выводить* можно выбрать следующие опции:

- **Среднее значение**;
- **Минимальное значение**;
- **Максимальное значение**;
- **Невязку**.

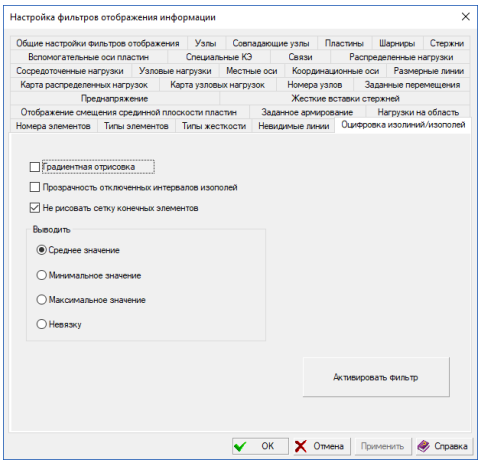



Рис. 12.4-8. *Страница* **Оцифровка**

Опция **Среднее значение** описана выше. При выборе опций **Минимальное/Максимальное значение** при построении изополей и изолиний в качестве значения фактора в узле используются соответственно минимальные/максимальные значения выбранного фактора из значений фактора в элементах, примыкающих к узлу. Опция **Невязка** приводит к отрисовке изополей и изолиний, для которых значение в узле равно разности максимального и минимального значений фактора в примыкающих элементах. Это позволяет оценить ошибку осреднения.

## Единицы измерений силовых факторов

Ниже приведена таблица с перечнем всех силовых факторов и их размерностей, а также указанием классов конечных элементов, в которых они могут возникать (размерность приведена в предположении, что используется базовая система единиц — тонны для измерения сил и метры для измерения линейных величин).

**Силовые факторы и единицы измерений**

| Идентификатор | Единицы измерения | Типы элементов | Примечания |
|---|---|---|---|
| N | Т | Стержни | осевое усилие |
| $M_K$ | Тм | Стержни | момент, крутящий сечение вокруг $X_1$ |
| M ($M_Z$) | Тм | Стержни | изгибающий момент относительно $Z_1$ |
| Q ($Q_Y$) | Т | Стержни | перерезывающая сила, действующая на сечение стержня вдоль оси $Y_1$ |
| $M_Y$ | Тм | Стержни | изгибающий момент относительно $Y_1$ |
| $Q_Z$ | Т | Стержни | перерезывающая сила, действующая на сечение стержня вдоль оси $Z_1$ |
| $R_Y$ | Т/м | Стержни | реактивный отпор грунта по направлению Y |
| $R_Z$ | Т/м | Стержни | реактивный отпор грунта по направлению Z |
| $N_X$ | Т/м$^2$ | Балки-стенки, объемные и осесимметричные | нормальное напряжение вдоль оси $X_1$, (для осесимметричных $N_r$) |
| $N_Y$ ($\sigma_x$) | Т/м$^2$ | Оболочки, балки-стенки[1], объемные и осесимметричные | нормальное напряжение вдоль оси $Y_1$, (для осесимметричных — $N_\theta$) |

[1] Указанные усилия в указанных элементах вычисляются только для задач плоской деформации.

| Идентификатор | Единицы измерения | Типы элементов | Примечания |
|---|---|---|---|
| $N_Z$ ($\sigma_y$) | Т/м$^2$ | Балки-стенки, оболочки [1], объемные и осесимметричные | нормальное напряжение вдоль оси $Z_1$: |
| $T_{XY}$ ($\tau_{xy}$) | Т/м$^2$ | Оболочки и объемные | сдвиг сечения в соответствующей плоскости, (для осесимметричных — $T_{rZ}$) |
| $T_{XZ}$ ($\tau_{xz}$) | Т/м$^2$ | Балки-стенки, объемные и осесимметричные | |
| $T_{YZ}$ ($\tau_{yz}$) | Т/м$^2$ | Объемные | |
| MX | Тм/пог. м | Оболочки, плиты | момент, действующий на сечение, ортогональное соответствующей оси |
| MY | Тм/пог. м | Оболочки, плиты | |
| MXY | Тм/пог. м | Оболочки, плиты | крутящий момент |
| $Q_X$ | Т/пог. м | Оболочки, плиты | перерезывающие силы в сечении, ортогональном соответствующей оси |
| $Q_Y$ | Т/пог. м | Оболочки, плиты | |
| $R_X$ | Т/м$^2$ | Оболочки, плиты при наличии соответствующего коэффициента постели | реактивный отпор грунта |
| $R_Y$ | Т/м$^2$ | | |
| $R_Z$ | Т/м$^2$ | | |
| WG | мм | Многослойные конечные элементы | |
| SNx($\Sigma\sigma_x$) | Т/м | Оболочки | суммарние нормальное усилие вдоль оси $X_1$ в сечении элемента |
| SNy($\Sigma\sigma_y$) | Т/м | Оболочки | суммарние нормальное усилие вдоль оси $Y_1$ в сечении элемента |
| SNxy($\Sigma\tau_{xy}$) | Т/м | Оболочки | суммарное усилие сдвига сечения в соответствующей плоскости |
| NX+($\sigma_x\uparrow$), NY+($\sigma_y\uparrow$), NXY+($\tau_{xz}\uparrow$), NX-($\sigma_x\downarrow$), NY-($\sigma_y\downarrow$), NXY-($\tau_{xz}\downarrow$) | Т/м$^2$ | Оболочки | напряжения на верхней и нижней поверхностях оболочки |
| RX | Т | Специальные | реакции |
| RY | Т | Специальные | |
| RZ | Т | Специальные (типа 53,54) | |
| RUX | Тм | Специальные | реактивные моменты |
| RUY | Тм | Специальные | |
| RUZ | Тм | Специальные | |
| $r_x$ | Т/м | Стержни | реактивный отпор грунта |
| $r_y$ | Т/м | | |
| $r_z$ | Т/м | | |
| B | Тм$^2$ | Стержни | бимомент |
| Tw | Тм | Стержни | момент стесненного кручения |

## 12.5. Анализ результатов работы постпроцессоров

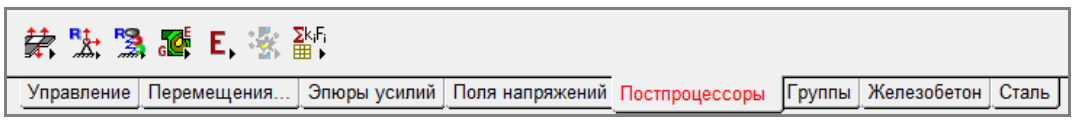



Рис. 12.5-1. *Раздел* **Постпроцессоры** *инструментальной панели*

Из раздела **Постпроцессоры** инструментальной панели (рис. 12.5-1) вызываются операции управления работой и анализа результатов работы постпроцессоров. К ним относятся:

 — отображение результатов расчета нагрузок *от фрагмента схемы* (см. главу 21);

 — отображение *реакций в связях* (см. раздел 12.6);

 — отображение усилий в *специальных конечных элементах* (см. раздел 12.7);

 — отображение результатов расчета *главных и эквивалентных напряжений* (см. главу 27);

 — анализ и отображение результатов оценки *энергетического* вклада элементов конструкции в процесс потери устойчивости системы (см. главу 26);

 — отображение результатов расчета *прогрессирующего разрушения* (см. главу 24);

 — анализ результатов выбора *расчетных сочетаний усилий* и *расчетных сочетаний перемещений* (см. главу 18).

Большинство описаний приведены в главах, посвященных работе соответствующих постпроцессоров.

## 12.6. Графическое отображение реакций в связях



Для вычисления реакций в связях следует активировать соответствующий маркер в диалоговом окне **Параметры расчета** (см. главу 11). В этом случае в процессе расчета будут получены значения реакций во всех узлах расчетной модели, в которых назначены связи. Управление графическим отображением результатов расчета реакций выполняется в разделе **Реакции в связях** инструментальной панели **Постпроцессоры** (рис. 12.6-1).

Реакции могут отображаться стрелками —  (аналогично узловым нагрузкам) или в виде цветовых маркеров —  . Кроме указанных кнопок инструментальная панель включает два списка. Первый — для выбора отображаемого фактора и второй — со списком загружений и комбинаций.

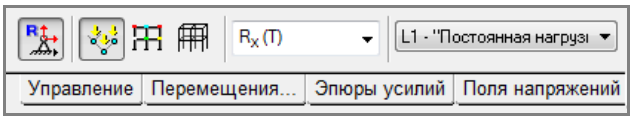



Рис. 12.6-1. *Инструментальная панель* **Реакции в связях**

Возврат к исходной расчетной схеме выполняется кнопкой  .

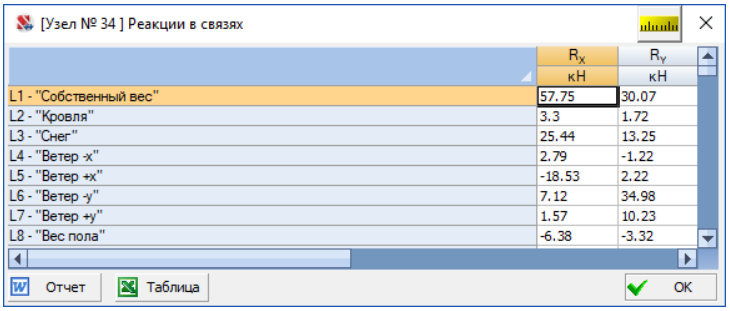



Рис. 12.6-2. *Диалоговое окно* **Реакции в связях**

Используя кнопку **Реакции в связях** диалогового окна **Информация об узле**, можно для выбранного узла получить таблицу с реакциями для всех загружений/комбинаций (рис. 12.6-2).

## 12.7. Графическое отображение усилий в специальных конечных элементах



Постпроцессор позволяет отобразить на расчетной схеме усилия в специальных конечных элементах.

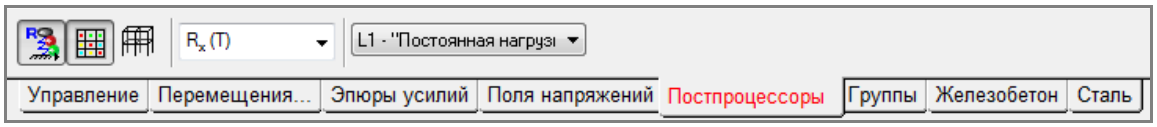



Рис. 12.7-1. *Инструментальная панель* **Усилия в специальных конечных элементах**

Инструментальная панель режима (рис. 12.7-1) включает следующие операции:

 — отображение цветовой карты усилий для выбранного загружения или комбинации загружений;

 — отображение расчетной схемы.

Для получения требуемого отображения следует из выпадающих списков инструментальной панели выбрать нужное загружение (или комбинацию загружений) и вид усилия.

Возврат к исходной расчетной схеме выполняется кнопкой  .

## 12.8. Формирование групп элементов

В разделе **Группы** инструментальной панели (рис. 12.8-1) выполняется назначение групп узлов и элементов для их постпроцессорной обработки.

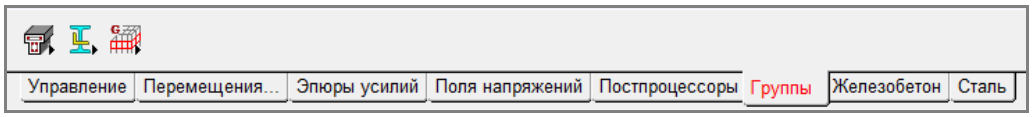



Рис. 12.8-1. *Инструментальная панель режима формирования* ***групп***

Раздел включает операции подготовки универсальных групп —  , которые повторяют аналогичные операции раздела **Группы** окна формирования расчетной схемы (разд. 6.6), и специальные   — для формирования конструктивных групп для постпроцессоров подбора/экспертизы элементов железобетонных и стальных конструкций.

Набор операций и порядок работы с группами железобетонных и стальных элементов описаны в главах 19, 20 соответственно.

# 13. Документирование исходных данных и результатов расчета

Для документирования исходных данных и результатов расчета можно использовать генератор таблиц в текстовом формате (результаты его работы отображаются в текстовом редакторе, указанном при настройке комплекса) или специальную подсистему — **Документатор**, с помощью которой таблицы экспортируются в MS Word или MS Excel.

Основные отличия между генератором таблиц и **Документатором** состоят в следующем:

- генератор таблиц позволяет получить за один раз в виде текстового файла одну таблицу указанного вида исходных данных или результатов;
- **Документатор** предназначен для формирования отчетного документа в виде документа MS Word или MS Excel с указанным набором исходных данных и/или результатов.

Принципы управления обеих подсистем весьма близки и описаны ниже.

Документирование результатов работы постпроцессоров подбора арматуры в элементах железобетонных конструкций, а также проверки и подбора сечений элементов стальных конструкций описаны отдельно в главах, посвященных этим постпроцессорам.

## 13.1. Генератор таблиц в текстовом формате

Общее управление генерацией таблиц осуществляется в диалоговом окне **Оформление результатов расчета** (рис. 13.1-1), которое вызывается из раздела **Печать таблиц** группы **Результаты** в **Дереве проекта**. Рассмотрим подробнее вопросы, связанные с настройкой режима вывода и печати результатов.

Для назначения правил формирования и оформления результатов используется кнопка **Параметры вывода**, после нажатия которой появляется многостраничное диалоговое окно (рис. 13.1-2). Из этого окна осуществляется доступ к следующим операциям:

- назначение параметров настройки генератора таблиц;
- задание списков узлов или элементов, для которых выводятся результаты;
- задание списка загружений;
- задание выходных единиц измерения.

Операции выполняются на страницах, которые вызываются после нажатия соответствующей закладки.

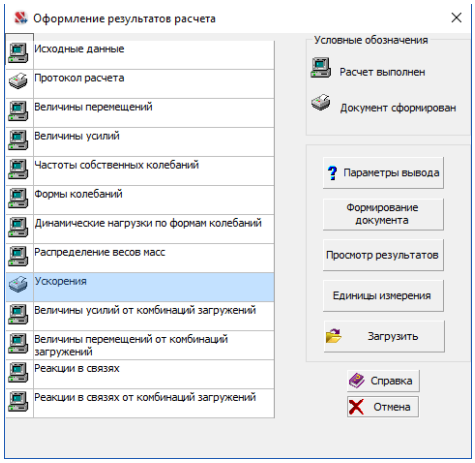



Рис. 13.1-1. *Диалоговое окно* **Оформление результатов расчета**

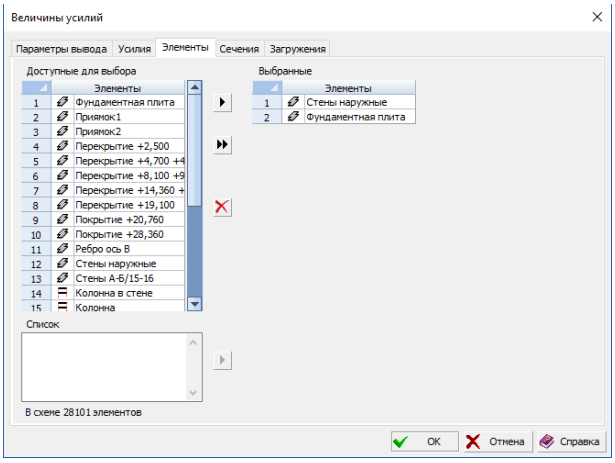



Рис. 13.1-2. *Страница* **Элементы** (*страница* **Узлы** аналогично)

Списки узлов и элементов задаются на страницах **Узлы** и **Элементы** (рис. 13.1-2), соответственно, в зависимости от вида результатов, назначенного в окне **Оформление результатов расчета**. По умолчанию на печать выводятся результаты для всех объектов схемы (список *Выбранные* пуст). В противном случае список объектов может быть введен в строке **Список**

узлов/элементов. Список состоит из номеров объектов, разделенных пробелом. Если номера идут подряд, то промежуточные объекты не перечисляются, а указываются номера первого и последнего через знак «-». Например, 1 2 4-9 23 56 72-109. После заполнения списка следует нажать находящуюся справа от строки ввода кнопку .

Кроме того, на этой странице находится список групп элементов/узлов. Выбрав одну или несколько групп в списке и нажав соответствующую кнопку , можно получить отчетный документ только для тех элементов/узлов, которые входят в выбранные группы. Кнопка позволяет "перенести" сразу все группы. Удаление отмеченных строк из списка **Выбранные** выполняется кнопкой .

Для выбора номеров загружений используется страница **Загружения** (рис. 13.1-3). По умолчанию вывод результатов выполняется для всех загружений (список *Выбранные* пуст). Если выводятся результаты только заданных загружений, то они выбираются из списка **Доступные для выбора**.

Кроме того, программа позволяет для стержневых элементов выбрать сечения, для которых будут выводиться усилия (например, выбрать только первое сечение); для РСУ можно указать, какие сочетания следует вводить в отчетный документ (например, только расчетные).

На странице **Параметры вывода** (рис. 13.1-4), можно назначить количество строк на странице и ширину таблиц, точность вывода перемещений и усилий, выбрать тип таблицы, ориентацию страниц и др.

В текстовом формате предусмотрена возможность формирования таблиц двух типов.

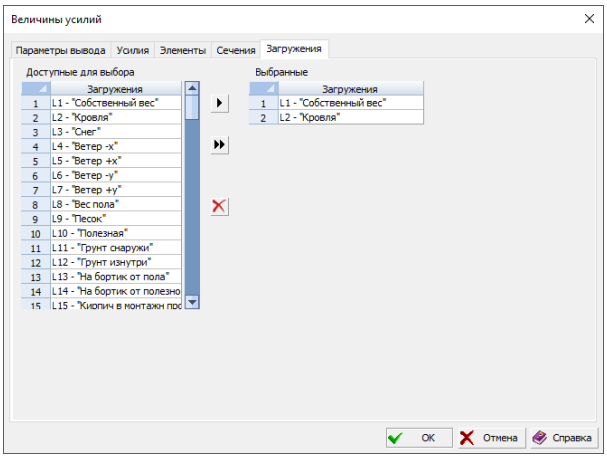



Рис. 13.1-3. *Страница* **Загружения**

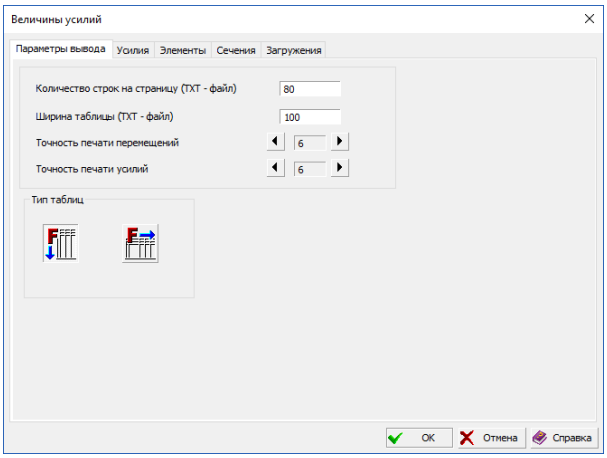



Рис. 13.1-4. *Страница* **Параметры вывода**

В таблицах первого типа (их опция помечена в группе **Тип таблиц** пиктограммой ) наименования силовых факторов или перемещений размещены в начале каждой строки, а в заглавиях столбцов помещены номера узлов или элементов. В таблицах второго типа (отмеченных пиктограммой ) в заглавиях столбцов помещаются наименования силовых факторов или перемещений, а в строках — номера элементов и узлов.

| Пример таблицы с выводом «по строкам» | | | |
|---|---|---|---|
| Перемещения узлов | | | |
| | 30 | 31 | 32 |
| 1 - Собственный вес | | | |
| X | –.003771 | .000777 | .000398 |
| Y | –.001397 | –.000824 | .000321 |
| Z | –4.50144 | –5.11411 | –5.41677 |

Пример таблицы с выводом «по столбцам»

| Узел | Загружение | X | Y | Z |
|---|---|---|---|---|
| 30 | 1 | –.003771 | –.001397 | –4.50144 |
| 31 | 1 | .000777 | –.000824 | –5.11411 |
| 32 | 1 | .000398 | .000321 | –5.41677 |

Используя соответствующую маску вывода, можно настроить программу на печать только определенных видов силовых факторов или перемещений (рис. 13.1-5 и 13.1-6).

Для формирования таблиц с результатами расчета следует выполнить следующие действия:

- активировать в **Дереве проекта** раздел **Печать таблиц** в группе **Результаты**;
- активировать в диалоговом окне **Оформление результатов расчета** опцию с наименованием фактора (например, **Перемещения** или **Усилия и напряжения**). Если выбранная информация существует, то рядом с наименованием опции стоит пиктограмма наличия информации  ;
- нажать кнопку **Параметры вывода** и назначить необходимые параметры (если параметры принимаются по умолчанию, этот шаг можно пропустить);
- нажать кнопку **Формирование документа** и дождаться появления рядом с наименованием фактора пиктограммы готовности таблицы —  ;
- нажать кнопку **Просмотр результатов**, после чего появляется окно/окна текстового редактора с таблицами результатов.

Перед вызовом функции печати таблиц необходимо выполнить настройку комплекса, установив в диалоговом окне **Выбор программы** (окно вызывается из пункта **Настройки визуализации таблиц результатов** в разделе меню ***Настройки***) наименование текстового редактора, в котором будет выполняться просмотр таблиц результатов.

Напомним, что существенным фактором, влияющим на качество представления результатов в таблицах, является выбор шрифта (Font). Удобочитаемость таблиц обеспечивают шрифты Courier (Cyrillic) или Courier New (Cyrillic), в которых все буквы и цифры имеют одинаковую ширину (т. н. непропорциональный шрифт).

Если таблица не помещается по ширине страницы, то можно уменьшить размер шрифта или перенастроить параметры страницы в текстовом редакторе, например, уменьшить отступы или изменить формат с книжного (портрет) на альбомный (ландшафт) или изменить точность вывода значений. Эти назначения можно сделать заранее на странице **Параметры вывода** (рис. 13.1-4).

Генератор таблиц в текстовом формате формирует таблицы, экспорт которых в электронные таблицы Excel или таблицы редактора Word достаточно трудоемок. Для получения полнофункциональных таблиц в комплексе предусмотрен специальный модуль — **Документатор**.

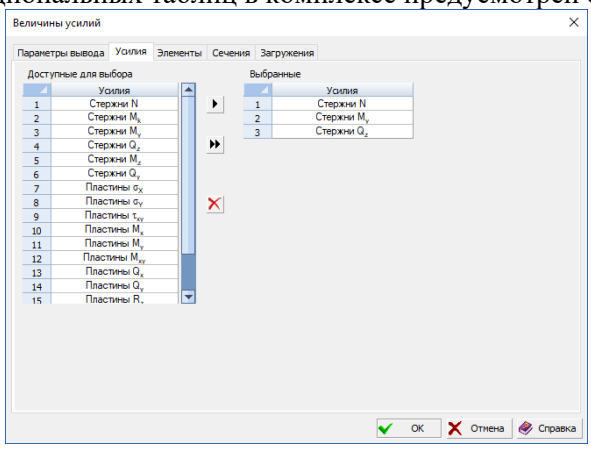



Рис. 13.1-5. *Страница* **Усилия**

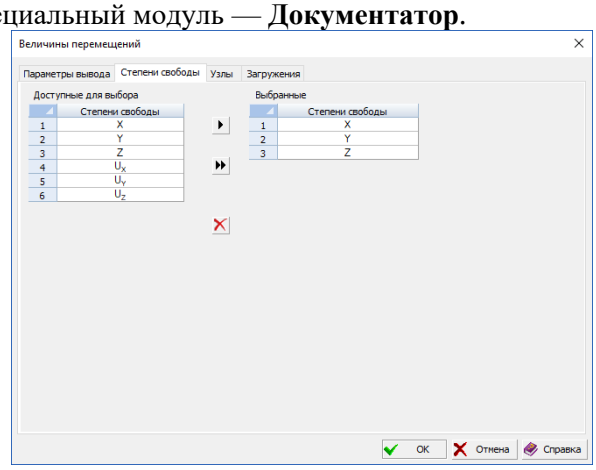



Рис. 13.1-6. *Страница* **Степени свободы**

Имена файлов в текстовом формате с результатами решаемой задачи формируются из имени файла с данными задачи XXX и расширения, начинающегося с латинской буквы P (XXX.Pnn). По окончании расчета всегда формируются файлы с информацией о ходе выполнения расчета — **Протокол выполнения расчета** (XXX.P01) и файл сообщений о формальных ошибках в исходных данных (XXX.P03).

В **Приложении** приведена таблица со списком расширений файлов с результатами расчета и результатами работы генератора таблиц.

**Протокол расчета (файл XXX.P01) рекомендуется просмотреть даже после успешного решения задачи**.

Если в процессе работы с **Документатором** (см. раздел 13.2) была использована операция сохранения структуры выходного документа (сформирован файл с расширением **.SCADDocMaker**), то в диалоговом окне **Оформление результатов расчета** (рис. 13.1-1) можно воспользоваться кнопкой **Загрузить**. Это позволит при оформлении таблиц использовать для каждого отдельного вида выходного документа такие же настройки, как и в **Документаторе**.

## 13.2. Документатор

Исходные данные и результаты расчета в табличной форме могут быть переданы в редактор MS Word или электронные таблицы MS Excel. Вызов программы формирования таблиц выполняется из раздела **Документирование** дерева проекта. Как уже отмечалось выше, управление генератором таблиц и **Документатором** весьма близки. Кратко опишем основные различия.

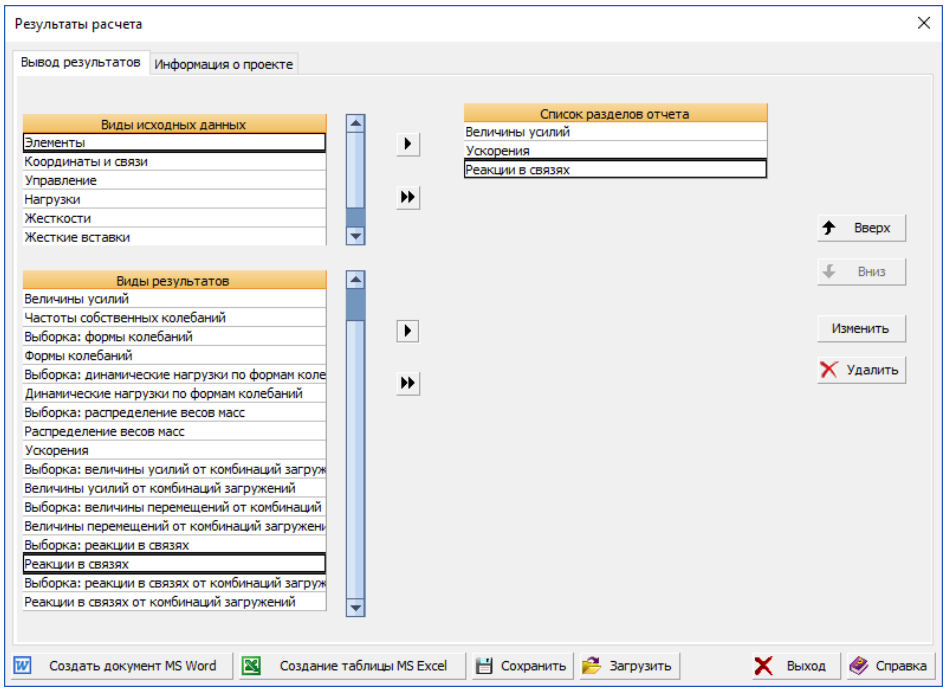



Рис. 13.2-1. *Диалоговое окно* **Результаты расчета**

Диалоговое окно документатора (рис. 13.2-1) включает ряд списков: **Виды исходных данных**, **Виды результатов**, **Информация о проекте**, **Список разделов отчета**.

**Виды исходных данных** – списки, подготовленные при формировании расчетной схемы, которые содержат информацию о группах узлов и элементов, управлении (рис. 13.2-2) и нагрузках (рис. 13.2-3). В системе **Документатор** при задании списков узлов/элементов, для которых следует выводить результаты расчета, предусмотрен маркер **Каждая группа в отдельной таблице**. Активация данной опции приводит к генерации отдельной таблицы для каждой выбранной группы узлов/элементов (или заданного пользователем списка номеров узлов/элементов), а не единой таблицы со всеми узлами/элементами, которые входят в выбранные группы;

**Виды результатов** — список результатов, полученных в процессе решения задачи;

**Список разделов отчета** — информация, отобранная пользователем для включения в отчет.

Для того чтобы какая-либо информация попала в отчет, необходимо перенести ее наименование в **Список разделов отчета**. Для этого используются кнопки с изображением одной ▶ и двух ⏩ стрелок. Первая из них обеспечивает выборочный перенос по одной строке из левого списка в правый, а вторая — перенос всего списка целиком.

В разделах отчета могут повторяться одинаковые виды исходных данных и результатов расчета. Это позволяет группировать информацию в отчете по каким-либо признакам, например, по принадлежности одной группе элементов или узлов.

Учитывая, что в процессе расчета возможно внесение изменений в расчетную модель, при работе с документатором предусмотрена возможность сохранения однажды заданной структуры документа, представленной в виде списка разделов отчета, в файле с расширением **.SCADDocMaker** и чтение этой структуры из файла после выполнения очередного варианта расчета. Для этого используются кнопки **Сохранить** и **Загрузить**, расположенные в нижней части диалогового окна **Результаты расчета**. При необходимости, записанная в файл структура отчета может неоднократно корректироваться и дополняться, а также быть загружена в генератор таблиц в текстовом формате.

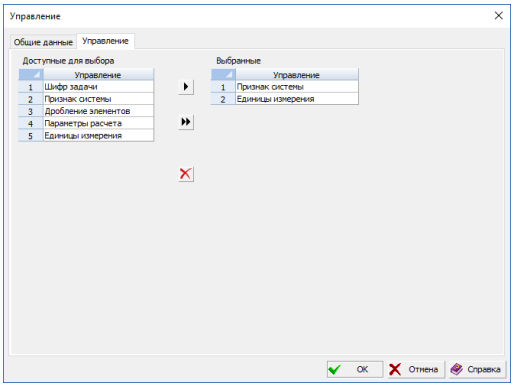



Рис. 13.2-2. *Страница* **Управление**

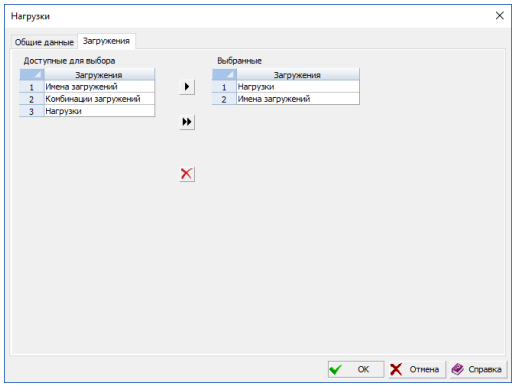



Рис. 13.2-3. *Страница* **Загружения**

При выводе результатов расчета нажатие кнопки ▶ приводит к вызову диалогового окна настройки содержания отчета (рис. 13.2-4). Структура этого окна универсальна и не зависит от вида результатов. Окно включает несколько страниц. На первой странице вводится наименование раздела отчета, которое после выхода из окна помещается в качестве названия раздела в **Список разделов отчета** окна документатора. Кроме того, на ней размещены три маркера:

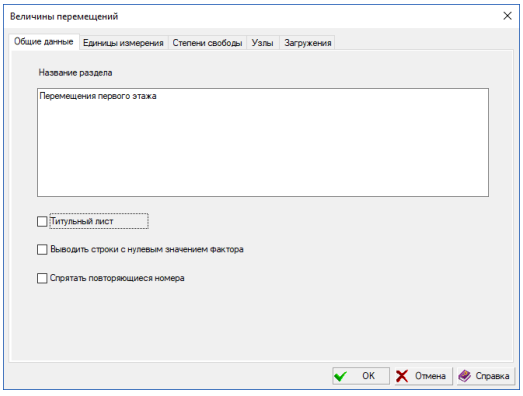



Рис. 13.2-4. *Диалоговое окно* **Величины перемещений**

**Титульный лист** — вывод титульного листа перед каждым разделом отчета;

**Выводить строки с нулевым значением фактора** — формирование таблиц с полным набором строк, включая и те строки, в которых все факторы имеют нулевое значение (эта возможность позволяет выполнять дополнительную обработку всех результатов в электронных таблицах Excel);

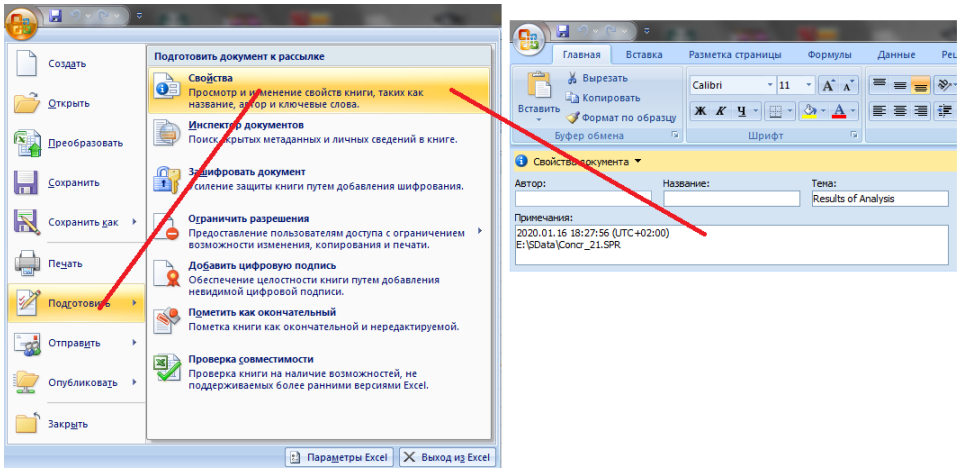
**Спрятать повторяющиеся номера** — исключается повторение в таблице номера одного узла или элемента (например, при выводе усилий в различных сечениях **стержней** одного элемента номер элемента будет выводиться только один раз рядом с номером первого сечения).

### Экспорт таблиц

Таблицы могут быть сформированы в формате **.xls** для экспорта в электронные таблицы Excel (составная часть системы Microsoft Office) или в формате **.rtf** — для последующей визуализации, обработки и печати в текстовом редакторе, например, Write, Word или др. Процесс подготовки отчета завершается формированием таблиц и их передачей в указанный текстовый редактор или электронные таблицы. Вызов соответствующего приложения выполняется из окна **Результаты расчета** (рис. 13.2-1). При этом появляется стандартное окно **Сохранить как** среды Windows, в

котором задается имя файла с таблицами результатов, после чего автоматически вызывается приложение, в которое загружается созданный файл.

При формировании xls-файла **Документатор** заносит информацию о пути к соответствующему spr-файлу и дате формирования отчета в свойства xls-документа:




## 13.3. Чтение результатов

В результате работы комплекса в первую очередь определяется напряженно-деформированное состояние конструкции под действием статических и динамических воздействий. Эти результаты включают перемещения узлов расчетной схемы, усилия (напряжения) в ее элементах, а также, в случае динамических воздействий, — частоты, периоды и формы собственных колебаний и динамические нагрузки, все эти данные могут быть отображены графически и таблично. Кроме того, они используются при работе различных постпроцессоров, входящих в состав комплекса (анализа устойчивости, подбора арматуры, проверки по различным теориям прочности, определения расчетных сочетаний усилий, комбинации загружений и т. п.), и ряда программ-сателлитов системы **SCAD Office** (таких, как **АРБАТ**, **Кристалл**).

Информация с результатами работы постпроцессоров подбора и проверки арматуры в элементах железобетонных конструкций, а также проверки и подбора сечений в элементах стальных конструкций описаны в соответствующих разделах книги.

### Окно работы процессора

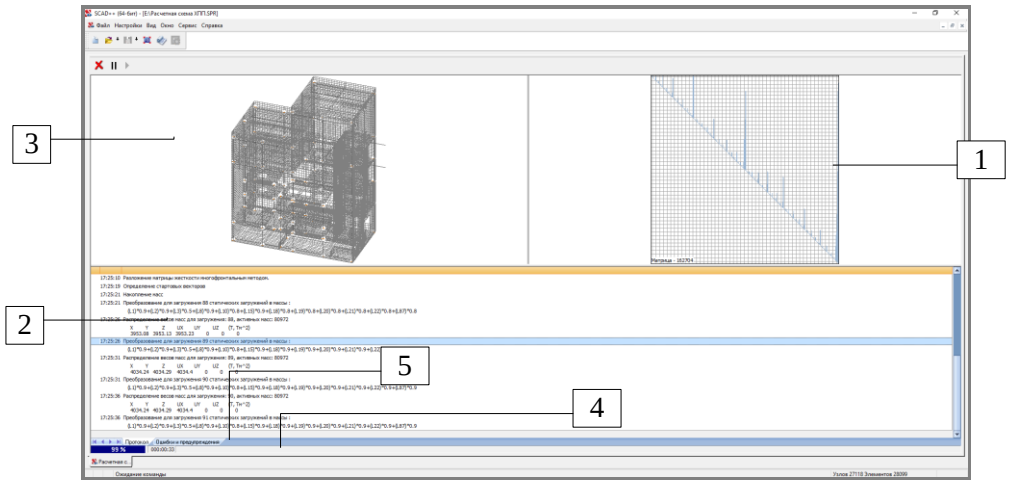



Рис. 13.3-1. *Окно* **SCAD** *в режиме выполнения расчета*

Это окно (рис. 13.3-1) появляется при выполнении расчета и включает четыре зоны:

1. Отображение профиля матрицы решаемой задачи с указанием количества степеней свободы[1];
2. Протокол выполнения расчета;
3. Изображение расчетной схемы;
4. Строка состояния с информацией о прохождении очередного этапа расчета и индикатор хода процесса.

Расчетная схема конструкции выводится в начале работы процессора. Изображение с помощью мыши можно вращать. Двойной щелчок левой кнопки мыши в поле расчетной схемы возвращает изображение в первоначальное положение.

### Протокол выполнения расчета

Протокол выполнения расчета формируется в процессе расчета задачи и включает: информацию о ходе выполнения основных этапов расчета конструкции и выявленных при этом ошибках и неточностях; данные о расчетной схеме, необходимых ресурсах для выполнения расчета; суммарных (по разрешенным в задаче направлениям) нагрузках для каждого из загружений и т. п.

Протокол необходимо ***обязательно просмотреть*** либо в процессе выполнения расчета, либо после его завершения. Особого внимания в протоколе требуют сообщения об ошибках (рис. 13.3-2), а также предупреждения об отклонении от нормальных режимов работы программы или допущенных в расчетной модели неточностях.

В протоколе, который выводится в окно выполнения расчета, начало строки с сообщениями об ошибках помечается знаком в красном поле, а с предупреждениями — в желтом. Если курсор расположен в поле журнала и нажата правая кнопка мыши, то появляется меню, две позиции которого позволяют сохранить в буфере (**Clipboard**) выбранную строку — команда **Копировать строку**, если какая-либо из строк в протоколе была предварительно селектирована, или все строки сообщений — команда **Копировать все строки**. Кроме того, при наличии ошибок и предупреждений после завершения расчета появляется закладка **Ошибки и предупреждения** (рис. 13.3-1, п.5), переход на которую открывает список всех замечаний, попавших в протокол по ходу расчета. Основные сообщения можно посмотреть также в журнале сообщений препроцессора и постпроцессора, работа с которым описана в разделе 4.1.

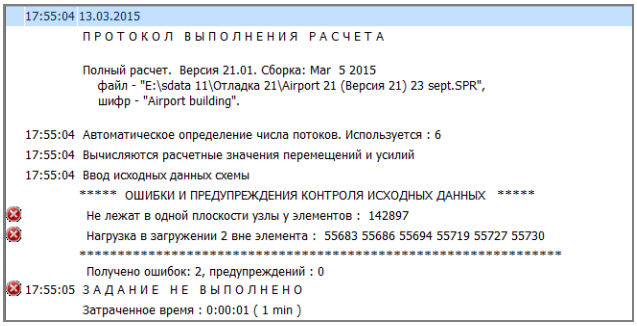



Рис. 13.3-2. *Сообщения об ошибках*

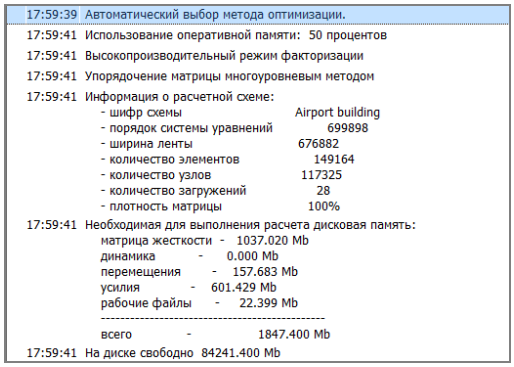



Рис. 13.3-3. *Сообщения об оптимизации матрицы жесткости, информация о расчетной схеме и необходимой дисковой памяти*

При успешном завершении синтаксического и семантического контроля следует несколько рабочих этапов, первым из которых при использовании прямых методов разложения матрицы жесткости выполняется оптимизация профиля матрицы (рис. 13.3-3). Успешное завершение этого этапа может значительно ускорить решение задачи. Так как в комплексе предлагается несколько методов оптимизации, то для получения наилучшего результата можно остановить процесс

[1] При решении задачи многофронтальным методом состояние профиля матрицы не корреспондируется со скоростью решения задачи.

решения задачи и попытаться выбрать иной метод. Кроме того, в программе предусмотрена возможность автоматического поиска оптимального метода оптимизации.

В протокол включается информация о расчетной схеме и ресурсах, необходимых для решения задачи (рис. 13.3-3). Обратите внимание на соотношение необходимой и свободной памяти на диске. Если свободной памяти недостаточно, следует остановить расчет (нажать кнопку **Приостановить расчет**  ) и постараться освободить диск, после чего продолжить расчет, нажав кнопку **Продолжить расчет**  . В том случае, когда в задаче есть динамические загружения и выбран режим, при котором число форм колебаний должно быть определено исходя из требуемого процента модальных масс, прогноз объема на жестком диске может быть значительно занижен.

Если на диске, где расположена директория с рабочими файлами и файлами результатов, нет возможности освободить необходимый объем памяти, следует выполнить следующие действия:

- нажать кнопку **Закрыть окно расчета**  и выйти из режима расчета;
- воспользоваться разделом **Закрыть проект** в меню ***Файл*** и закрыть задачу;
- в разделе **Назначение рабочих директорий** меню ***Настройки*** переадресовать рабочую директорию на другой диск;
- открыть проект и выполнить расчет сначала.

После разложения матрицы жесткости может появиться сообщение о ***геометрической изменяемости системы*** (рис. 13.3-4) с указанием номеров узлов и направлений перемещений, по которым автоматически установлены связи (запрещены перемещения).

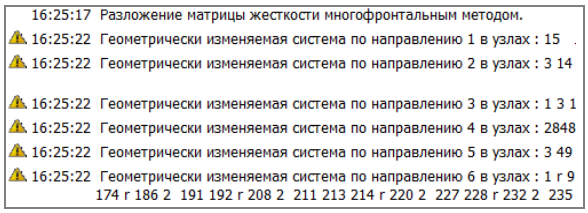



Рис. 13.3-4. *Сообщения о геометрической изменяемости системы*

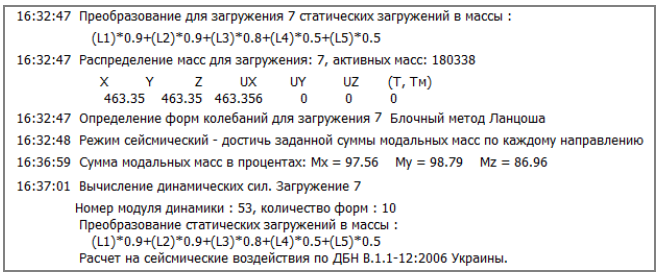



Рис. 13.3-5. *Сообщения при наличии динамических воздействий*

Геометрическая изменяемость может быть связана, например, с ошибками в назначениях условий опирания конструкции (связей) или с недостаточным для конкретной задачи значением точности разложения матрицы (минимально допустимым числом на диагонали матрицы уравнений при ее разложении).

Автоматически назначенные связи необходимо тщательно проанализировать. Часто они не соответствуют конкретным условиям опирания конструкции, и в этих случаях следует корректно назначить условия опирания и заново решить задачу.

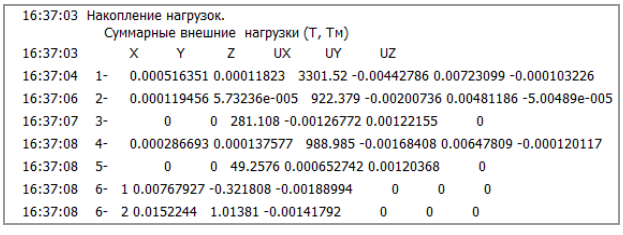



Рис. 13.3-6. *Таблица распределения суммарных нагрузок*

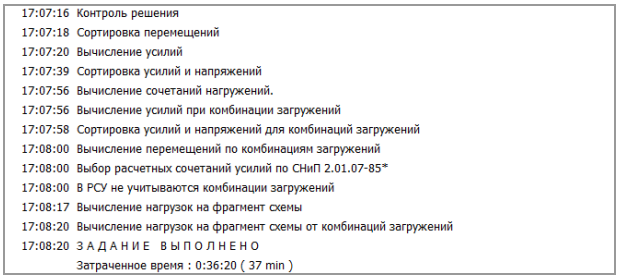



Рис. 13.3-7. *Сообщение о нормальном завершении расчета*

В тех случаях, когда геометрическая изменяемость связана с особенностями расчетной схемы, может потребоваться изменение значения точности разложения матрицы, которое выполняется в окне **Параметры расчета** (см. главу 11).

Сообщение о наличии нулевых строк матрицы жесткости является информационным и появляется при наличии в расчетной схеме элементов различной размерности (например, оболочек и объемных). Если в задаче предусмотрен расчет на динамические воздействия, то кроме информации об этапах расчета протокол будет включать данные о количестве и распределении активных масс (рис. 13.3-5).

В протоколе указываются значения суммарной узловой нагрузки (рис. 13.3-6). В зависимости от выбранной опции в параметрах управления расчетом (см. главу 11), в протоколе будут указаны значения либо с учетом нагрузок, «ушедших в связи», либо без их учета. Возможно вычисление суммарных моментов относительно центра координат.

Обычно пользователь приблизительно знает суммарные нагрузки на конструкцию по линейным направлениям. Если граничные условия задачи не очень сложны, то можно определить, соответствует ли вычисленная суммарная нагрузка заданной. Если нагрузка в загружении меньше заданной, следует искать пропущенные нагрузки, а если больше — то лишние.

На этапе контроля решения возможно появление сообщения с указанием величины ошибки, возникшей при решении системы уравнений для контроля загружения. Кроме того, указываются глобальный номер уравнения, номер узла и номер локального уравнения, локализующие место возможного источника ошибки.

Причиной ошибки может оказаться «почти геометрически изменяемая система» или соседство элементов с очень большим перепадом жесткостей. В любом случае необходимо тщательно проанализировать возможные причины появления этого сообщения.

В настройках **Параметров расчета** (см. главу 11) можно отключить опцию, активирующую контроль решения, но ответственность за это полностью лежит на пользователе.

## Документирование исходных данных

Вычислительный комплекс **SCAD** дает возможность отобразить в графическом виде расчетную схему конструкции и большинство ее атрибутов (нагрузки, связи, шарниры и т. п.). В тех случаях, когда необходимо получить информацию о тех или иных характеристиках расчетной схемы в табличном виде, можно воспользоваться **Документатором** или **Генератором таблиц** в текстовом формате. Очевидно, что полное табличное описание схемы, состоящей из многих тысяч узлов и элементов, нецелесообразно из соображений больших объемов данных. Однако описание жесткостных характеристик элементов (рис. 13.3-8) и некоторые другие таблицы могут быть полезны в процессе работы над схемой и для архивирования «твердых копий» проектных материалов.

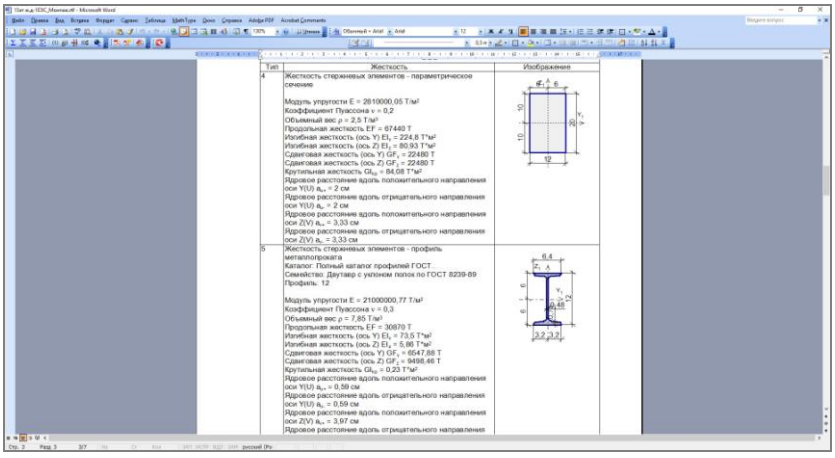


Рис. 13.3-8. *Пример отображения таблицы жесткостей в редакторе* MS Word

## 13.4. Перемещения узлов

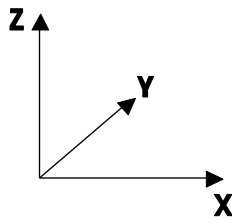



Рис. 13.4-1. *Глобальная система координат*

Одной из основных характеристик напряженно-деформированного состояния являются перемещения узлов расчетной схемы проектируемой конструкции. Они всегда вычисляются в основной (глобальной) декартовой системе координат XYZ (рис. 13.4-1). Количество вычисляемых для каждого узла смещений определяется используемым признаком схемы (см. главу 3).

В пространственных конструкциях, для которых задан признак схемы *Система общего вида* «5», в узле присутствуют шесть смещений:

**X** — линейное перемещение вдоль оси X;
**Y** — линейное перемещение вдоль оси Y;
**Z** — линейное перемещение вдоль оси Z;
$\mathbf{U_X}$ — угол поворота вокруг оси X;
$\mathbf{U_Y}$ — угол поворота вокруг оси Y;
$\mathbf{U_Z}$ — угол поворота вокруг оси Z.

Для схемы, имеющей признак «1» (плоская шарнирно-стержневая система), вычисляются только линейные перемещения **X** и **Z**.

Для некоторых признаков схемы узлу расчетной схемы приписываются дополнительные степени свободы (дополнительные неизвестные), которые уже не отождествляются с компонентами линейных или угловых перемещений узла, как бесконечно малого жесткого тела в точке, совпадающей с центром узла.

Таким дополнительным неизвестным, например, может быть вторая смешанная производная (кручение) деформированной поверхности плиты или компоненты деформаций поперечного сдвига и обжатия в слоистых кусочно-неоднородных пологих оболочках. Как правило, эти величины являются вспомогательными и используются для повышения точности вычисления основных неизвестных схемы (линейных смещений и углов поворота), и их вычисленные значения можно не анализировать.

### Положительные направления перемещений

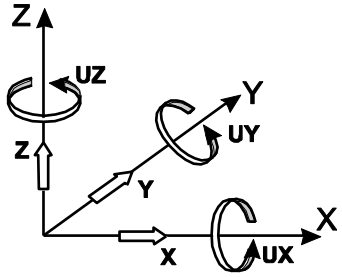



Рис. 13.4-2. *Положительные направления линейных и угловых перемещений*

Положительные направления линейных перемещений совпадают с направлением соответствующих осей **X**, **Y**, **Z** (рис. 13.4-2). Для угловых перемещений $\mathbf{U_X}$, $\mathbf{U_Y}$, $\mathbf{U_Z}$ в качестве положительного принят поворот против часовой стрелки вокруг соответствующей оси, если смотреть с ее конца.

## Таблицы перемещений

По умолчанию перемещения выводятся в миллиметрах, а угловые величины — в тысячных долях радиана. Заданные единицы измерений выводятся в заголовке каждой таблицы.

| Имена загружений | |
|---|---|
| Номер | Наименование |
| 1 | Постоянное |
| 2 | Полезное |
| 3 | Снег |
| 4 | Ветер по X |
| 5 | Ветер против X |
| 6 | Ветер по Y |
| 7 | Ветер против Y |

Рис. 13.4-3. *Таблица «Имена загружений»*

Раздел может состоять из:

- наименований загружений с их номерами (рис. 13.4-3). В остальных секциях вместо наименований загружений используется их номер;
- максимальных и минимальных перемещений расчетной схемы (рис. 13.4-4). При этом можно напечатать таблицу как для произведенной выборки, так и для всей расчетной схемы;
- собственно значений перемещений для заданного в **Документаторе** списка узлов, загружений (рис.13.4-5) и заданных факторов.

**Выборка: величины перемещений**
Единицы измерения: дюйм
Параметры выборки:
Список узлов/элементов: Все
Список загружений/комбинаций: Все
Список факторов: Все

| Выборка: величины перемещений | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Наименование | Максимальные значения | | | Минимальные значения | | |
| | Значение | Узел | Загружение | Значение | Узел | Загружение |
| X | 0,422 | 302 | 6 | -0,582 | 302 | 7 |
| Y | 5,469 | 302 | 6 | -7,325 | 302 | 7 |
| Z | 0,082 | 72 | 6 | -1,904 | 209 | 1 |
| $U_X$ | 0,338 | 789 | 1 | -0,327 | 776 | 1 |
| $U_Y$ | 0,217 | 783 | 1 | -0,133 | 1736 | 1 |
| $U_Z$ | 24,824 | 302 | 6 | -33,629 | 302 | 7 |

Рис. 13.4-4. *Таблица «Выборка: величины перемещений»*

В шапке таблицы с величинами перемещений показываются единицы измерения и параметры выборки: списки узлов, загружений и выводимых факторов.

**Величины перемещений**
Единицы измерения: мм
Параметры выборки:
Список узлов/элементов: 32-46 405 867-877 2425-2427
Список загружений/комбинаций: Все
Список факторов: Все

| Величины перемещений | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Узел | Загружение | Значение | | | | | |
| | | X | Y | Z | $U_X$ | $U_Y$ | $U_Z$ |
| 32 | 1 | -0,002 | 0,005 | -34,936 | 0,113 | 0,034 | -0,011 |
| 32 | 2 | 2,32e-004 | 5,129e-005 | -3,169 | 0,012 | 0,004 | -0,001 |
| 32 | 3 | -1,511e-004 | 1,791e-004 | -0,714 | 0,003 | 0,003 | 5,603e-005 |
| 32 | 4 | 0,168 | 0,053 | -0,962 | -0,001 | 0,014 | 0,01 |
| 32 | 5 | -0,154 | -0,046 | 0,892 | 0,001 | -0,013 | -0,009 |
| 32 | 6 | 0,021 | 0,154 | 0,972 | -0,016 | 2,428e-004 | 0,008 |
| 32 | 7 | -0,021 | -0,154 | -0,971 | 0,016 | -2,447e-004 | -0,008 |
| 33 | 1 | -0,001 | 0,008 | -34,748 | 0,131 | -0,011 | -0,007 |
| 33 | 2 | 2,285e-004 | 3,468e-004 | -3,099 | 0,014 | 4,557e-004 | -0,001 |
| 33 | 3 | -7,306e-005 | 1,96e-004 | -0,593 | 0,003 | 0,001 | 6,441e-005 |
| 33 | 4 | 0,167 | 0,017 | -0,237 | -0,001 | 0,01 | 0,008 |
| 33 | 5 | -0,153 | -0,015 | 0,221 | 0,001 | -0,009 | -0,007 |
| 33 | 6 | 0,02 | 0,14 | 0,953 | -0,013 | 0,001 | 0,006 |

Рис. 13.4-5. *Фрагмент таблицы «Величины перемещения»*

При наличии динамических загружений в столбце **Номер формы** могут выводиться (см. разд. 12.1 **Выбор загружения**):

**SD** – ссылка на свертку динамической составляющей, которая определяется по соответствующим нормативным документам;

**LS+SD** – амплитуда от статической (например, ветровой) и суммарной динамической нагрузок;

**RD** и **RI** – при расчете на гармонические колебания с действительной и комплексной составляющими воздействия с указанием номера;

**T** – при прямом интегрировании уравнений движения с указанием номера точки сохранения.

Для нелинейного расчета, вариации моделей и монтажа есть особенности идентификации, описанные в соответствующих разделах.

Средняя составляющая показывает, какое направление (знак соответствующего перемещения) следует принимать во внимание при анализе результатов учета пульсации. Кроме того, некоторые нормативные документы (например, СНиП 2.01.07-85* «Нагрузки и воздействия») допускают ограничивать число учитываемых форм собственных колебаний конструкции. Поэтому, несмотря на заказ определенного количества форм, при выполнении расчета их может быть учтено меньше. Знак величины перемещения (и усилия) от всех учтенных форм определяет знак соответствующего перемещения (усилия) от статической составляющей ветровой нагрузки.

### Перемещения от комбинаций загружений

Перемещения узлов, полученные в результате расчета комбинаций статических загружений, вычисляются как алгебраическая сумма перемещений от каждого входящего в комбинацию загружения с учетом заданных для них коэффициентов. Если в комбинацию входит одно или несколько динамических загружений, то для каждого из них (кроме пульсационной составляющей ветрового потока) перемещения от всех форм, как правило, берутся по формуле:

$$\delta = \sqrt{\sum_{i=1}^{KF} \delta_i^2},$$

где KF — число вычисленных форм собственных колебаний,

$\delta_i$ — обобщенное перемещение от *i*-той формы собственных колебаний.

Для пульсационной составляющей ветрового потока перемещения вычисляются по формуле:

- по СНиП — $\delta = \delta_c \pm \sqrt{\sum_{i=1}^{KF} \delta_i^2}$;
- по МГСН — $\delta = \delta_c \pm \delta_d$,

где KF — число вычисленных форм собственных колебаний;

$\delta_i$ — обобщенное перемещение от *i*-той формы собственных колебаний;

$\delta_d$ — динамическая составляющая, которая определяется с учетом корреляции форм собственных колебаний и которая выводится отдельной строкой в таблице;

*c* — номер загружения статической составляющей ветрового воздействия.

Знак плюс или минус подкоренного выражения принимается в соответствии со знаком $\delta_c$.

Вычисленные по этим формулам перемещения учитываются затем с заданным коэффициентом в соответствующих комбинациях.



**Очевидно, что описанные выше процедуры вычисления перемещений нелинейные, и значения перемещений, которые возникают в процессе, например, сейсмических колебаний, полученные по правилу «корень из суммы квадратов», соответствуют различным моментам времени. Фактически в каждом узле определяется независимая от других узлов оценка максимума перемещения, и при этом не учитывается знак.**

## 13.5. Таблицы усилий и напряжений в элементах

За исключением небольшой группы конечных элементов величины усилий (напряжений) вычисляются в местной (локальной) системе координат, индивидуальной для каждого из элементов

(см. главу 3). Для плоских и объемных конечных элементов возможно задание определенной пользователем системы координат выдачи усилий (напряжений), отличной от направления осей местной системы координат, что позволяет более корректно использовать полученные результаты. Например, рекомендуется задавать эти направления выдачи усилий при подборе арматуры в перекрытиях, где необходимо анализировать полученные значения усилий и напряжений после приведения результатов расчета к единым осям, хотя местные оси элементов могут быть направлены произвольно.

Величины усилий для стержневых КЭ в общем случае вычисляются для трех сечений: в начале, середине и конце стержня. Можно назначить и большее количество сечений вычисления усилий (до 255).

**Выборка: величины усилий**
Единицы измерения: Т, м
Параметры выборки:
Список узлов/элементов: Все
Список сечений: Все
Список загружений/комбинаций: Все
Список факторов: Все

| Выборка: величины усилий | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Наименование | Максимальные значения | | | | | Минимальные значения | | | | |
| | Значение | Элемент | Сечение | Загружение | Номер формы | Значение | Элемент | Сечение | Загружение | Номер формы |
| N | 14,406 | 113 | 1 | 6 | 1 | -68,315 | 202 | 1 | 1 | |
| $M_k$ | 0,01 | 59187 | 1 | 6 | 1 | -0,013 | 217 | 1 | 6 | 1 |
| $M_y$ | 5,052 | 59124 | 3 | 6 | 1 | -5,811 | 59123 | 1 | 6 | 1 |
| $Q_z$ | 6,986 | 59124 | 1 | 6 | 1 | -2,284 | 101 | 1 | 7 | 1 |
| $M_z$ | 1,521 | 207 | 3 | 7 | 1 | -1,668 | 204 | 1 | 7 | 1 |
| $Q_y$ | 1,725 | 59124 | 1 | 1 | | -2,686 | 99 | 1 | 6 | 1 |
| $N_X$ | 927,235 | 30454 | 1 | 6 | 1 | -831,55 | 16225 | 1 | 6 | 1 |
| $N_Y$ | 419,215 | 25586 | 1 | 6 | 1 | -569,617 | 25586 | 1 | 1 | |
| $\tau_{XY}$ | 474,695 | 49804 | 1 | 6 | 1 | -288,341 | 61080 | 1 | 7 | 1 |
| $M_X$ | 10,666 | 3328 | 1 | 1 | | -8,09 | 2653 | 1 | 1 | |
| $M_Y$ | 8,15 | 6040 | 1 | 1 | | -6,971 | 4749 | 1 | 1 | |
| $M_{XY}$ | 4,796 | 54752 | 1 | 7 | 1 | -4,5 | 5229 | 1 | 1 | |
| $Q_X$ | 863,67 | 2647 | 1 | 6 | 1 | -245,17 | 2647 | 1 | 1 | |
| $Q_Y$ | 1196,152 | 2647 | 1 | 7 | 1 | -1972,14 | 2653 | 1 | 6 | 1 |
| $R_z$ | 4,964 | 54864 | 1 | 7 | 1 | -28,862 | 54836 | 1 | 1 | |

Рис. 13.5-1. *Таблица «Выборка: величины усилий»*

В пластинчатых и объемных КЭ величины усилий и напряжений по умолчанию вычисляются для точки, являющейся центром масс элемента, хотя предусмотрена возможность вычисления усилий также во всех его узлах.

**Величины усилий**
Единицы измерения: Т, м
Параметры выборки:
Список узлов/элементов: 3-8 74-106 109-446 7327-7330 9105-9115 12696-12706
Список загружений/комбинаций: Все
Список факторов: N, $M_k$, $M_y$, $Q_z$, $M_z$, $Q_y$, $N_X$, $N_Y$, $\tau_{XY}$, $M_X$, $M_Y$, $M_{XY}$

| Величины усилий | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Элемент | Сечение | Загружение | Значение | | | | | |
| | | | N | Mk | My | Qz | Mz | Qy |
| 3 | 1 | 1 | -137,051 | 0,208 | 5,589 | -2,702 | 11,855 | 5,685 |
| 3 | 1 | 2 | -10,39 | 0,015 | 0,492 | -0,29 | 1,243 | 0,71 |
| 3 | 1 | 3 | -3,126 | 0,008 | -0,062 | 0,066 | 0,083 | 0,031 |
| 3 | 1 | 4 | 1,257 | -0,201 | 1,038 | -0,718 | 0,698 | 0,511 |
| 3 | 1 | 5 | -1,193 | 0,181 | -0,972 | 0,674 | -0,63 | -0,464 |
| 3 | 1 | 6 | -3,316 | -0,169 | -0,498 | 0,384 | 0,815 | 0,64 |
| 3 | 1 | 7 | 3,306 | 0,169 | 0,498 | -0,384 | -0,819 | -0,642 |
| 3 | 2 | 1 | -136,143 | 0,208 | 1,13 | -2,702 | 2,474 | 5,685 |
| 3 | 2 | 2 | -10,39 | 0,015 | 0,014 | -0,29 | 0,071 | 0,71 |
| 3 | 2 | 3 | -3,126 | 0,008 | 0,047 | 0,066 | 0,032 | 0,031 |
| 3 | 2 | 4 | 1,257 | -0,201 | -0,147 | -0,718 | -0,145 | 0,511 |

Рис. 13.5-2. *Фрагмент таблицы «Величины усилий»*

Раздел может состоять из:

- наименований загружений (рис. 13.4-3). В остальных секциях вместо наименований загружений используются их номера;
- максимальных и минимальных значений силовых факторов (рис. 13.5-1). При этом можно напечатать таблицу как для произведенной выборки, так и для всей расчетной схемы;
- собственно значений силовых факторов (всех или заданных) для указанного в **Документаторе** списка элементов и загружений (рис. 13.5-2).

Перед каждой из приведенных выше таблиц указаны единицы измерения и параметры выборки: списки узлов, загружений и выводимых факторов.

При наличии динамических загружений появляется столбец **Номер формы**, где могут, кроме информации по формам колебаний, выводиться также характеристики строк **SD**, **LS+SD**, **T**, **RD** и **RI**, которые указывают на свертку динамической составляющей и т. д. (см. разд. 12.1 **Выбор загружения**).

Для нелинейного расчета, вариации моделей и монтажа есть особенности идентификации, описанные в соответствующих разделах.

**Величины усилий**
Единицы измерения: Т, м
Параметры выборки:
Список узлов/элементов: 9263
Список загружений/комбинаций: 1
Список факторов: Все

| Величины усилий | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Элемент | Сечение | Загружение | Значение | | | | | | | | |
| | | | $N_X$ | $N_Y$ | $\tau_{XY}$ | $M_X$ | $M_Y$ | $M_{XY}$ | $Q_X$ | $Q_Y$ | $R_z$ |
| 9263 | 1 | 1 | -1,202 | -1,979 | -0,612 | -3,552 | -3,23 | -3,352 | -10,384 | -11,442 | -15,366 |
| 9263 | 2 | 1 | -1,051 | -1,223 | -0,628 | -7,689 | -4,097 | -2,174 | -10,384 | -11,442 | -15,313 |
| 9263 | 3 | 1 | -1,243 | -1,987 | -0,313 | -2,96 | -9,264 | -3,039 | -10,384 | -11,442 | -14,92 |
| 9263 | 4 | 1 | -1,092 | -1,231 | -0,329 | -7,763 | -9,425 | -1,862 | -10,384 | -11,442 | -14,874 |
| 9263 | 5 | 1 | -1,147 | -1,605 | -0,47 | -5,491 | -6,504 | -2,608 | -10,384 | -11,442 | -15,116 |

Рис. 13.5-3.

Если при создании расчетной схемы была задана опция расчета силовых факторов в узлах многоузловых конечных элементов, то в таблицах с результатами значения силовых факторов первые номера сечений соответствуют значениям в узлах, а последний номер сечения соответствует центру масс элемента. В приведенном примере (рис. 13.5-3) для четырехузлового конечного элемента выведены значения силовых факторов в пяти “сечениях”: четыре первых — в узлах и пятого — в центре.

Значения силовых факторов, полученные в результате расчета комбинаций статических загружений, вычисляются как алгебраическая сумма соответствующих факторов от каждого входящего в комбинацию загружения с учетом заданных для них коэффициентов.

При комбинации динамических загружений берутся суммарные усилия, вычисленные для основного динамического усилия и имеющие идентификацию **S**.



**Вычисленные значения силовых факторов от динамических воздействий, полученные по правилу «корень из суммы квадратов» или другому закону, нелинейные и соответствуют различным моментам времени. Фактически в каждом элементе определяется независимая от других элементов оценка максимума и при этом не учитывается знак. Это может привести к потере равновесия в узлах.**

## 13.6. Напряжения и усилия

### Усилия в стержнях

Усилия в стержнях выдаются в локальной (местной) прямоугольной системе координат.

Усилия определяются на гибкой части элемента

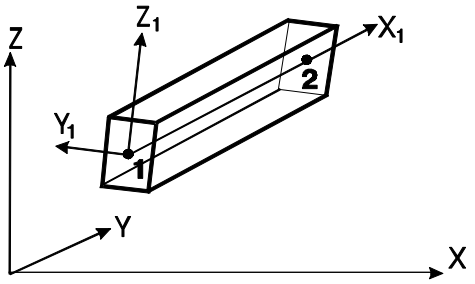



Рис. 13.6-1.

(рис. 13.6-1) и относительно главных осей инерции в сечении, проведенном перпендикулярно продольной оси стержня. Первое сечение относится к началу гибкой части, последнее — к концу. Об ориентации местной системы координат стержня подробно говорится в разд. 3.3.

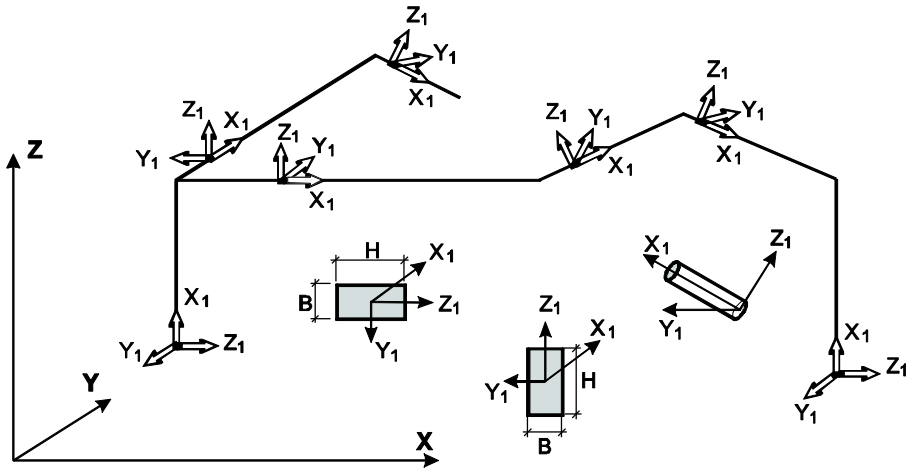



Рис. 13.6-2.

Для удобства чтения результатов расчета рекомендуется отобразить на расчетной схеме направления местных координатных осей (рис. 13.6-2). Тогда становится ясным расположение поперечных сечений стержня, номера которых увеличиваются в сторону возрастания координаты $X_1$, а также направления действия изгибающих моментов и поперечных сил.

### *Усилия в стержнях различного типа*

Усилия, которые могут возникать в разных типах конечных элементов стержней, а также возможные степени свободы их узлов приведены в таблице 13.6-1.

**Таблица 13.6-1**

| Тип КЭ | Наименование КЭ | Располо-жение | Степени свободы | Вычисляемые усилия |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Стержень плоской фермы | пл. XOZ | X, Z | N, $M_Y$, Q ($Q_Z$), $r_X$ |
| 2 | Стержень плоской рамы | пл. XOZ | X, Z, $U_Y$ | N, $M_Y$, Q ($Q_Z$), $r_X$, $r_Z$ |
| 3 | Стержень балочного ростверка | пл. XOY | Z, $U_X$, $U_Y$ | $M_K$ ($M_X$), $M_Y$, $Q_Z$, $r_Z$ |
| 4 | Стержень пространственной фермы | любое | X, Y, Z | N, $M_K$, $M_Y$, $Q_Z$, $M_Z$, $Q_Y$, $r_X$ |
| 5 | Пространственный стержень | любое | X, Y, Z, $U_X$, $U_Y$, $U_Z$ | N, $M_K$, $M_Y$, $Q_Z$, $M_Z$, $Q_Y$, $r_X$, $r_Y$ , $r_Z$ |
| 6 | Пространственный стержень с учетом сдвига | любое | X, Y, Z, $U_X$, $U_Y$, $U_Z$ | N, $M_K$, $M_Y$, $Q_Z$, $M_Z$, $Q_Y$, $r_X$, $r_Y$ , $r_Z$ |
| 7 | Стержень балочного ростверка на упругом основании | пл. XOY | Z, $U_X$, $U_Y$ | $M_K$ ($M_X$), $M_Y$, $Q_Z$, $r_Z$ |
| 10 | Универсальный стержень | по признаку схемы | по признаку схемы или типу элемента | N, $M_K$, $M_Y$, $Q_Z$, $M_Z$, $Q_Y$, $r_X$, $r_Y$ , $r_Z$ |

Для стержней типов 1 и 4 моменты и поперечные силы появляются при наличии местной нагрузки на элементы.

При обозначении усилий в стержневых элементах в таблицах принято, что направление действия фактора обозначено строчной буквой (в отличие от многоузловых элементов, где для этого используются прописные буквы).

**Таблица 13.6-2**

| Обозначение силового фактора | Наименование | Единицы измерений (в базовой системе единиц) | Положительный знак усилия определяет |
|---|---|---|---|
| N | Продольная сила | Т | Растяжение |
| $M_K$ (или $M_X$) | Крутящий момент, вращение относительно продольной оси $X_1$ стержня | Тм | Действие против часовой стрелки, если смотреть с конца оси $X_1$ на сечение, принадлежащее концу стержня |
| $M_Y$ | Изгибающий момент, вращение относительно оси $Y_1$; вызывает растяжение-сжатие нижних и верхних волокон по высоте сечения (по направлению оси $Z_1$) | Тм | Растяжение нижнего (относительно направления оси $Z_1$) волокна сечения |
| $Q_Z$ | Перерезывающая сила в направлении оси $Z_1$ по высоте сечения и соответствующая моменту $M_Y$ | Т | Сдвиг в направлении оси $Z_1$ сечения, принадлежащего концу стержня |
| $M_Z$ | Изгибающий момент, вращение относительно оси $Z_1$; вызывает сжатие-растяжение правых и левых волокон сечения по ширине сечения (по направлению оси $Y_1$) | Тм | Растяжение верхнего (относительно направления оси $Y_1$) волокна сечения |
| $Q_Y$ | Перерезывающая сила в направлении оси $Y_1$ по ширине сечения и соответствующая моменту $M_Z$ | Т | Сдвиг в направлении оси $Y_1$ сечения, принадлежащего концу стержня |
| $r_X$ | Реактивный отпор грунта по направлению X при задании коэффициента постели $C_{1X}$ | Т/м | Действие по направлению оси $X_1$ (знак минус означает, что грунт сжат) |
| $r_Y$ | Реактивный отпор грунта по направлению Y при задании коэффициента постели $C_{1Y}$ | Т/м | Действие по направлению оси $Y_1$ (знак минус означает, что грунт сжат) |
| $r_Z$ | Реактивный отпор грунта по направлению Z при задании коэффициента постели $C_{1Z}$ | Т/м | Действие по направлению оси $Z_1$ (знак минус означает, что грунт сжат) |

### *Положительные направления усилий в стержнях*

Положительные направления усилий в стержнях приняты следующими:

- для перерезывающих сил $Q_Z$ и $Q_Y$ — по направлениям соответствующих осей $Z_1$ и $Y_1$;
- для моментов $M_X$, $M_Y$, $M_Z$ — против часовой стрелки, если смотреть с конца соответствующей оси $X_1$, $Y_1$, $Z_1$;
- положительная продольная сила всегда растягивает стержень.

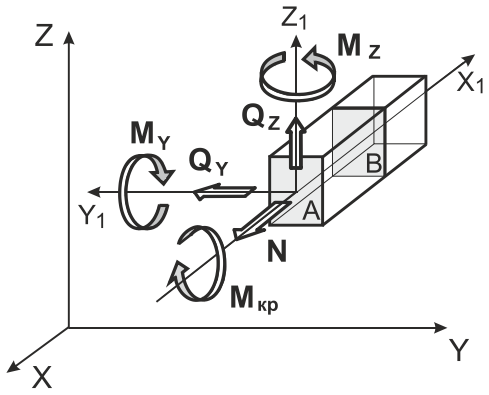



Рис. 13.6-3. *Положительные направления усилий в стержнях*

Внутренние силы (усилия) в любом сечении (рис. 13.6-3) уравновешены (направлены навстречу друг другу). Для выдачи результатов следует выбрать одну из плоскостей сечения (одну группу направления усилий).

Выбрано то сечение, которое часто называется принадлежащим концу стержня. В начале стержня (рис. 13.6-3) — это то сечение, которое мы видим и на которое воздействует «отброшенная» часть остальной конструкции. В конце стержня — это все-таки не последнее, а почти последнее сечение.

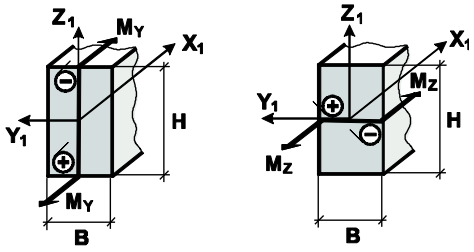



Рис. 13.6-4.

Если положительный момент $M_Y$ (балочный момент) растягивает нижние (относительно направления оси $Z_1$) волокна сечения стержня и в то же время вращает сечение против часовой стрелки (смотреть с конца оси $Y_1$), то усилия следует показывать для плоскости А (рис. 13.6-4, 13.6-5) как воздействия внутренних сил со стороны отброшенной части стержня, которая примыкает к началу гибкой части.

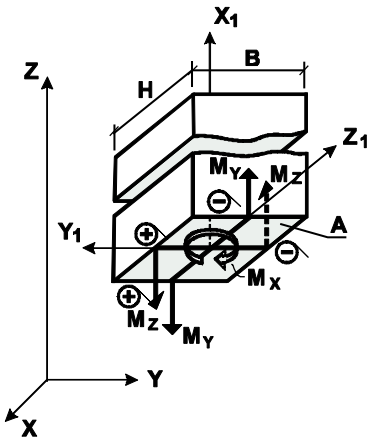



Рис. 13.6-5.

На рисунках показаны положительные направления внутренних усилий в сечении стержня, а в таблице 13.6-2 приведены правила их чтения. Единицы измерения вычисляемых усилий в таблице даны в базовой системе единиц.

На рис. 13.6-4, 13.6-5 знаком «+» (плюс) помечена растянутая, а знаком «–» (минус) — сжатая грань сечения от воздействия положительных моментов $M_Y$ и $M_Z$.

Если на стержень прикладываются существенные сосредоточенные местные нагрузки, то при выдаче результатов могут потеряться наибольшие (по абсолютной величине) значения перерезывающих сил и моментов (рис. 13.6-7, *a*, *b*), а кроме того, например, и один из знаков усилия (рис. 13.6-7, *b*). Это может произойти и тогда, когда сосредоточенная нагрузка приложена «почти» в точке выдачи усилий.

В таких случаях полезно назначить в стержне дополнительный узел (рис. 13.6-7, *c*), т. е. разделить стержень на два, тогда одна группа усилий попадет в конец одного, а другая — в начало другого стержня (нагрузка здесь уже не местная, а узловая).

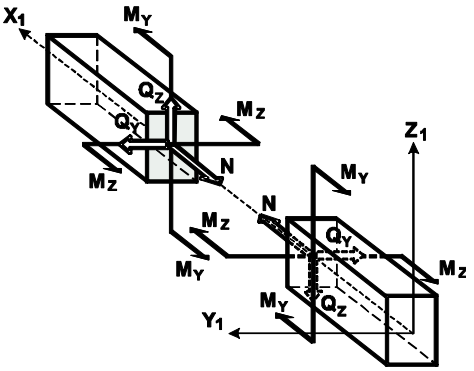



Рис. 13.6-6.

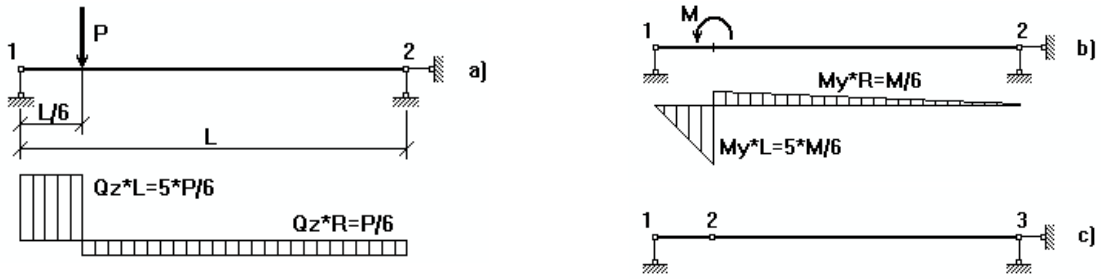



Рис. 13.6-7.

## Плоские конечные элементы

### *Местная система координат плоских элементов*

Начало местной системы координат (разд. 3.4) элементов пластин находится в узле, которому присвоен номер 1 (узел 1); два следующих узла (узлы 2 и 3) полностью определяют направление осей $X_1$ и $Y_1$ для плит и оболочек и осей $X_1$ и $Z_1$ — для балок-стенок.

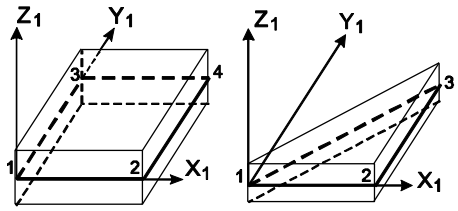



Рис. 13.6-8. *Плиты и оболочки*

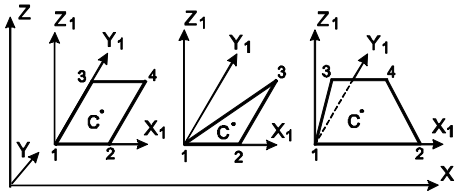



Рис. 13.6-9. *Плиты и оболочки*

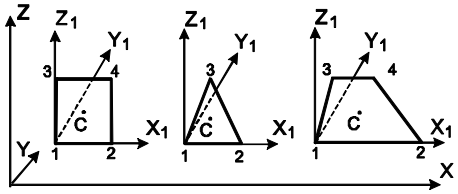



Рис. 13.6-10. *Элементы для решения плоской задачи теории упругости (балки-стенки)*

Направления местных осей (рис. 13.6-8) для плит и оболочек следующие:

- ось $X_1$ пластины направляется от узла 1 к узлу 2 (узлу, который задан вторым);
- ось $Y_1$ пластины лежит в плоскости элемента, перпендикулярна оси $X_1$ и направлена в сторону третьего узла;
- ось $Z_1$ ортогональна $X_1$ и $Y_1$ и составляет с ними правую тройку.

Для КЭ балок-стенок следовало бы выбрать ту же систему координат, что для плит и оболочек. Однако, учитывая то, что элементы балок-стенок чаще всего располагаются в плоскости XOZ (и плоскостях, параллельных ей) общей системы координат, принята такая система, когда в плоскости элемента лежат оси $X_1$ и $Z_1$, а ось $Y_1$ перпендикулярна его плоскости (рис. 13.6-10); т. е., если сравнивать с плитами и оболочками, то меняются местами оси $Z_1$ и $Y_1$.

Для всех плоских конечных элементов возможно вычисление усилий и напряжений в системе координат, отличной от местной. Правила задания этих систем описаны в разд. 3.4. Их использование удобно для дальнейшего анализа результатов расчета.

**У конечного элемента типа 22 (треугольная балка-стенка), лежащего в плоскости, параллельной XOZ, местная система координат совпадает с общей.**

### Группа усилий (напряжений) в плоских элементах

Усилия (напряжения) в плоских конечных элементах вычисляются, как правило, для центра тяжести элемента (точка С на рис. 13.6-9 и 13.6-10), хотя предусмотрена возможность вычисления усилий (напряжений) в узлах. Если не задана специальная система координат, они вычисляются в местной системе координат элемента. Вычисляемые усилия и напряжения, а также направления степеней свободы их узлов приведены в таблице 13.6-3.

**Таблица 13.6-3**

| Тип КЭ[1] | Краткое название | Плоскость (или параллельная ей) | Перемещения узлов | Усилия, напряжения |
|---|---|---|---|---|
| **Конечные элементы плиты** | | | | |
| 11, 13<br>12, 14, 15<br>19, 20 | Прямоугольные<br>Треугольные<br>Четырехугольные<br>*(Все элементы могут быть на упругом основании)* | XOY | Z, $U_X$, $U_Y$ | $M_X$, $M_Y$, $M_{XY}$,<br>$Q_X$, $Q_Y$,<br>($R_Z$) |
| **Конечные элементы балки-стенки** | | | | |
| 21<br>22<br>23, 26 | Прямоугольные<br>Треугольные<br>Прямоугольные | XOZ<br>XOZ<br>произвольно | X, Z<br>X, Z<br>X, Y, Z | <br><br>$N_X$, $N_Y$[1], $N_Z$, $\tau_{XZ}$ |

[1] В колонке **Тип КЭ** указаны две последние цифры типа элемента.

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 24, 25, 28<br>30<br>27 | Треугольные<br>Четырехугольные<br>Четырехугольные | произвольно<br>XOZ<br>произвольно | X, Y, Z<br>X, Z<br>X, Y, Z | |
| **Конечные элементы оболочки** | | | | |
| 41<br>42, 45<br>44, 50 | Прямоугольные<br>Треугольные<br>Четырехугольные<br>*(Все элементы могут быть на упругом основании)* | произвольно | X, Y, Z,<br>$U_X$, $U_Y$, $U_Z$ | $N_X$, $N_Y$, $\tau_{XY}$,<br>$M_X$, $M_Y$, $M_{XY}$,<br>$Q_Y$, $Q_X$, ($R_Z$) |

Вычисляемые усилия и напряжения более подробно описаны в таблице 13.6-4, где даны и правила знаков для них.

**Таблица 13.6-4**

| Тип КЭ | Обозначение силового фактора | Размерность в базовых единицах | Описание | Правило знаков |
|---|---|---|---|---|
| **Мембранные напряжения** | | | | |
| 21–30<br>41–50 | $N_X(\sigma_x)$ | Т/м$^2$ | Нормальное напряжение, действующее вдоль оси $X_1$ | Положительный знак соответствует растяжению |
| 21–30<br>41–50 | $N_Y(\sigma_y)$ | Т/м$^2$ | Нормальное напряжение, действующее вдоль оси $Y_1$ | Положительный знак соответствует растяжению<br>*(Для элементов 21–30 вычисляется только для плоско-деформированных систем)* |
| 21–30 | $N_Z(\sigma_z)$ | Т/м$^2$ | Нормальное напряжение, действующее вдоль оси $Z_1$ | Положительный знак соответствует растяжению |
| 41–50 | $T_{XY}(\tau_{xy})$ | Т/м$^2$ | Сдвигающее напряжение | Сдвиг сечения элемента в направлениях, противоположных осям $X_1$ и $Y_1$ |
| 21–30 | $T_{XZ}(\tau_{xz})$ | Т/м$^2$ | Сдвигающее напряжение | Сдвиг сечения элемента в направлениях, противоположных осям $X_1$ и $Z_1$ |
| **Изгибные напряжения (усилия)** | | | | |
| 11–20<br>41–50 | $M_X$ | Тм/пог. м | Момент, действующий на сечение, ортогональное оси $X_1$ | Положительный момент вызывает растяжение нижнего (относительно оси $Z_1$) волокна сечения |
| | $M_Y$ | Тм/пог. м | То же, ортогональное оси $Y_1$ | То же |
| | $M_{XY}$ | Тм/пог. м | Крутящий момент (действующий в сечении, ортогональном оси $X_1$). | Вращение сечения элемента, против часовой стрелки, если смотреть с конца оси $X_1$ |
| | $Q_X$ | Т/пог. м | Перерезывающая сила в сечении, ортогональном оси $X_1$ | Положительная перерезывающая сила действует по направлению оси $Z_1$ на той части КЭ, в которой отсутствует узел 1 |
| | $Q_Y$ | Т/пог. м | То же, ортогональном оси $Y_1$ | |
| **Реактивный отпор грунта** | | | | |
| 11–30<br>41–50 | $R_X$ | Т/м$^2$ | Реактивный отпор грунта при расчете плит и оболочек на упругом основании | Положительное усилие действует по направлению оси $X_1$ (знак минус означает, что грунт сжат) |
| 11–20<br>41–50 | $R_Y$ | Т/м$^2$ | Реактивный отпор грунта при расчете плит и оболочек на упругом основании | Положительное усилие действует по направлению оси $Y_1$ (знак минус означает, что грунт сжат) |
| 21–30<br>41–50 | $R_Z$ | Т/м$^2$ | Реактивный отпор грунта при расчете плит и оболочек на упругом основании | Положительное усилие действует по направлению оси $Z_1$ (знак минус означает, что грунт сжат) |

[1] Усилие $N_Y$ появляется при расчете плоских деформированных систем.

В любой системе единиц моменты и поперечные силы определяются на единицу длины (например, 1 метр) независимо от заданных размеров сторон элементов (0.001 м или 10.000 м).

Кроме того, вычисляются:

- суммарные (по толщине) нормальные усилия $\Sigma\sigma_x, \Sigma\sigma_y, \Sigma\sigma_{xy}$ (Т/м);
- главные напряжения $N_{min}$, $N_{max}$ (Т/м$^2$);
- главные суммарные (по толщине) нормальные усилия $\Sigma N_{min}, \Sigma N_{max}$ ( Т/м);
- главные моменты $M_{min}$, $M_{max}$ (Тм/пог. м);

### Правила знаков для усилий (напряжений) в плоских конечных элементах

Для каждой точки вычисления усилий (напряжений) фактически рассматриваются проходящие через нее два сечения:

- перпендикулярное оси $X_1$;
- перпендикулярное оси $Y_1$.

Понятно, что внутренние силы (усилия, напряжения) в любом сечении уравновешены (направлены в противоположные стороны).

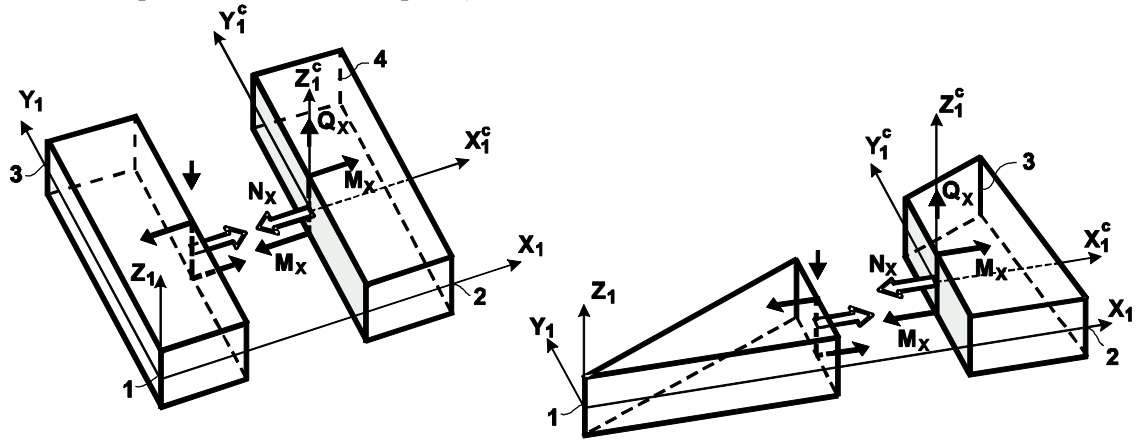



Рис. 13.6-11.

Для выдачи результатов расчета следует выбрать одну из плоскостей сечения. В приведенных примерах (рис. 13.6-11, 13.6-12, 13.6-13) выбрана плоскость сечения, принадлежащая той части элемента, которая включает в себя последний узел. Таким образом, выбраны те направления группы усилий (напряжений), с которыми действует отброшенная (с узлом 1) часть пластины на вторую ее часть — ту, которая включает в себя последний узел (узел 3 для треугольных либо узел 4 для четырехугольных элементов).

В первом сечении вычисляются компоненты усилий, действующих на выбранную плоскость (рис. 13.6-11):

$N_X$ — нормальное напряжение в сечении (Т/м$^2$) от растяжения-сжатия элементов оболочки; положительные $N_X$ вызывают растяжение сечения в направлении, параллельном оси $X_1$;

$M_X$ — изгибающий момент на единицу длины сечения (Тм/пог. м), положительный $M_X$ сжимает верхние (по отношению к направлению оси $Z_1$) и растягивает нижние волокна сечения в направлении, параллельном оси $X_1$;

$Q_X$ — перерезывающая сила на единицу длины сечения (Т/пог. м), положительное направление $Q_X$ совпадает с направлением оси $Z_1$.

Во втором сечении вычисляются (рис. 13.6-12):

$N_Y$ — нормальное напряжение в сечении (Т/м$^2$) от растяжения-сжатия элементов оболочки; положительные $N_Y$ вызывают растяжение сечения в направлении, параллельном оси $Y_1$;

$M_Y$ — изгибающий момент на единицу длины сечения (Тм/пог. м), положительный $M_Y$ сжимает верхние (по отношению к направлению оси $Z_1$) и растягивает нижние волокна сечения в направлении, параллельном оси $Y_1$;

$Q_Y$ — перерезывающая сила на единицу длины сечения (Т/пог. м), положительное направление $Q_Y$ совпадает с направлением оси $Z_1$.

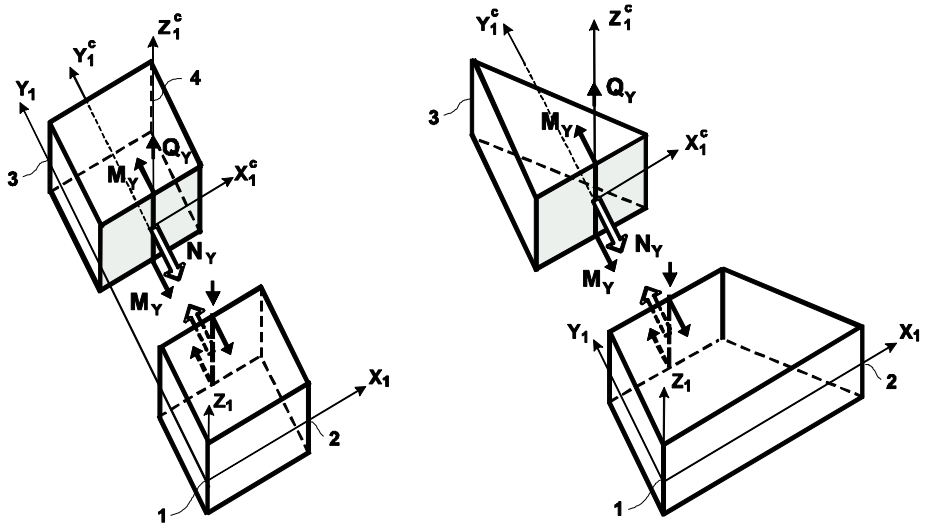



Рис. 13.6-12.

В каждом из этих сечений также вычисляются парные усилия и напряжения (рис. 13.6-13):

$T_{YX}$, равное $T_{XY}$, — сдвигающие напряжения (Т/м$^2$), положительное направление сдвига противоположно направлению оси $Y_1$; положительные сдвигающие напряжения стремятся как бы растянуть сечение той части элемента, в которую входит последний узел (диагональ квадрата, исходящую из узла 4 в квадратном конечном элементе);

$M_{XY}$, равное $M_{YX}$, — крутящий момент (Тм/пог. м); положительный $M_{XY}$ сжимает верхние (по отношению к оси $Z_1$) и растягивает нижние волокна сечения в направлении, параллельном оси $Y_1$, т. е. момент скручивает сечение, принадлежащее концу элемента, по часовой стрелке, если смотреть на сечение по направлению оси $X_1$, и против часовой стрелки, если смотреть с конца оси $X_1$.

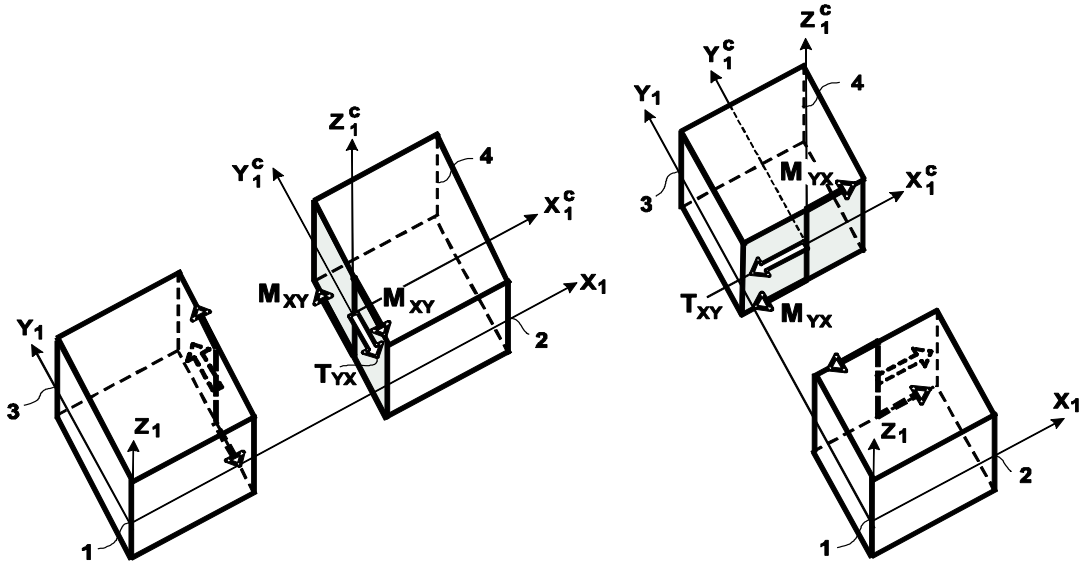



Рис. 13.6-13.

Те же сечения принимаются и для конечных элементов балки-стенки (рис. 13.6-14), только напряжения $N_Y$ и $T_{XY}$, соответствующие элементам оболочки, следует заменить на $N_Z$ и $T_{XZ}$, соответствующие балке-стенке.

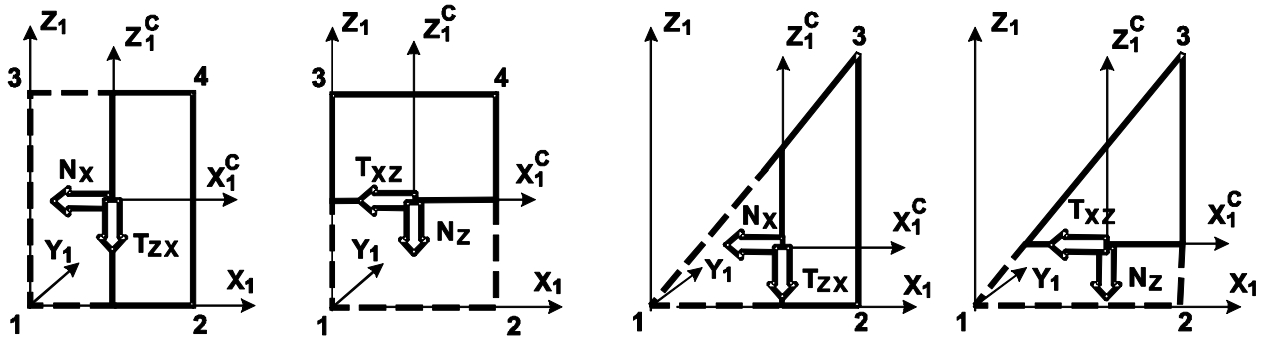



Рис. 13.6-14.

Усилия и напряжения по умолчанию вычисляются всегда для центра тяжести элемента и, если задано, в его узлах.

Наглядно показать воздействие на плоские конечные элементы усилий можно следующим образом (рис. 13.6-15 и рис. 13.6-16.):

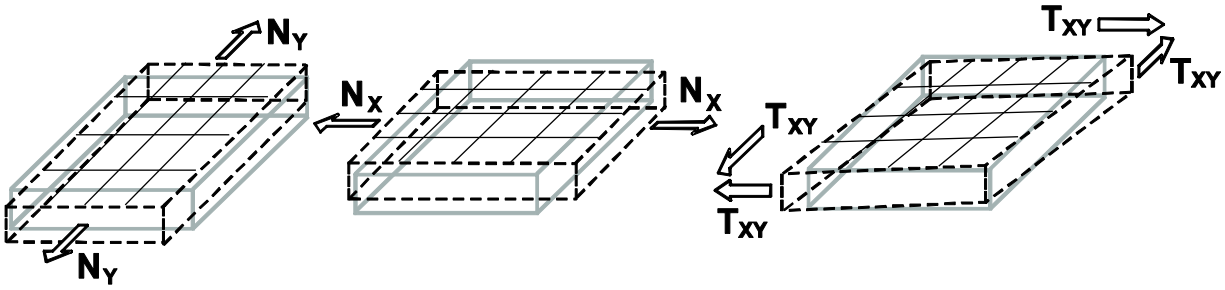



Рис. 13.6-15. *Мембранная группа усилий*

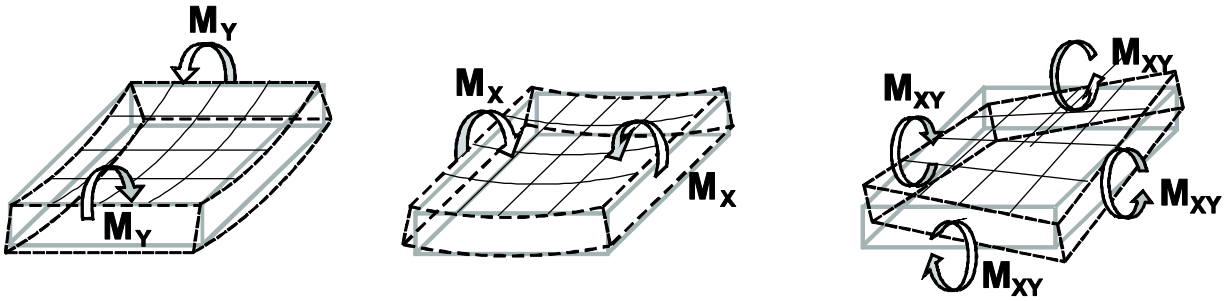



Рис. 13.6-16. *Изгибная группа усилий*

### *Положительные направления напряжений в конечных элементах балки-стенки*

В конечных элементах, предназначенных для расчета плосконапряженных (балок-стенок) или плоскодеформированных систем, вычисляются следующие напряжения (разд. 3.4):

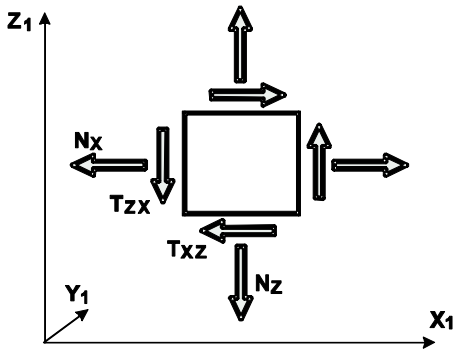



Рис. 13.6-17.

- нормальные напряжения $N_X$, $N_Z$;
- сдвигающее напряжение $T_{XZ}$;
- нормальное напряжение $N_Y$ для плоскодеформированных систем.

Положительные направления $N_X$ и $N_Z$ растягивают сечения балки-стенки, проведенные через центр тяжести элемента перпендикулярно осям $X_1$ и $Z_1$, соответственно. Направление напряжений принято для той части сечения, к которой принадлежит последний из основных (3-й — для треугольных либо 4-й — для четырехугольных) узлов, т. е. определяется воздействие отброшенной (с узлом 1) части на оставшуюся (с узлами 3 либо 4) часть элемента.

Если элемент растягивается либо сжимается только параллельно осям $X_1$ и $Z_1$, то всегда $T_{XZ}$ равно нулю, т. е. сечения, перпендикулярные осям $X_1$ и $Z_1$, в этом случае совпадают с главными площадками.

На рис. 13.6-17 показаны напряжения, действующие по граням элементарного прямоугольника, вырезанного в окрестности центра тяжести конечного элемента балки-стенки, а в таблице 13.6-4 приведены правила чтения напряжений.

Отметим здесь же, что при решении задачи плоской деформации кроме напряжений $N_X$, $N_Z$, $T_{XZ}$, действующих в плоскости элемента, выдается значение нормального к плоскости напряжения $N_Y$, которое действует в направлении, ортогональном плоскости элемента, а его положительный знак означает растяжение.

### *Положительные направления усилий в КЭ плит*

Для конечных элементов плиты вычисляются следующие усилия:

- моменты $M_X$, $M_Y$ и $M_{XY}$;
- перерезывающие силы $Q_X$ и $Q_Y$;
- реактивный отпор грунта $R_Z$ (только при учете упругого основания).

Положительные моменты $M_X$, $M_Y$, $M_{XY}$ растягивают нижние (по отношению к направлению оси $Z_1$) волокна сечений, проведенные через центр тяжести КЭ перпендикулярно осям $X_1$, $Y_1$, соответственно. Направление усилий $M_X$, $M_Y$, $M_{XY}$, $Q_X$, $Q_Y$ принято для той части сечения, к которой принадлежит последний из основных (3-й для треугольных либо 4-й для четырехугольных) узлов элемента, т. е. определяется воздействие отброшенной (с узлом 1) части на оставшуюся часть. Положительное направление перерезывающих сил $Q_X$ и $Q_Y$ совпадает с направлением оси $Z_1$.

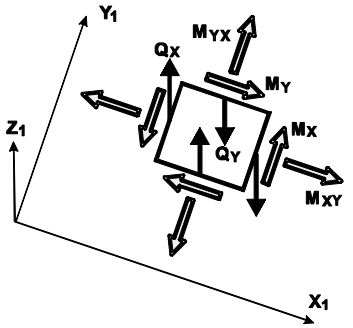



Рис. 13.6-18.

На рис. 13.6-18 показаны перерезывающие силы и векторы моментов, действующие по граням элементарного прямоугольника, вырезанного в окрестности центра тяжести элемента плиты, а в таблице 13.6-4 приведены правила чтения усилий.

### Положительные направления напряжений и усилий в КЭ оболочки

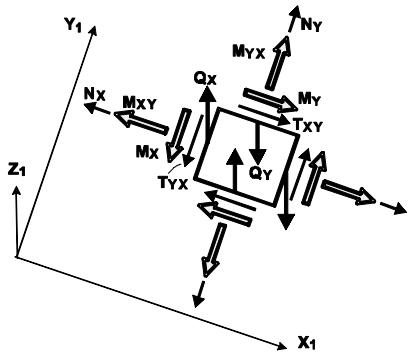



Рис. 13.6-19.

В конечных элементах оболочки вычисляются следующие усилия:

- нормальные напряжения $N_X$, $N_Y$;
- сдвигающее напряжение $T_{XY}$;
- моменты $M_X$, $M_Y$ и $M_{XY}$;
- перерезывающие силы $Q_X$ и $Q_Y$;
- реактивный отпор грунта $R_Z$ (только при учете упругого основания).

Элемент оболочки выполнен таким образом, что совмещает в себе свойства элементов балки-стенки и плиты, поэтому все пояснения, приведенные выше, справедливы и для настоящего раздела.

На рис. 13.6-19 показаны напряжения, перерезывающие силы и векторы моментов, действующие по граням элементарного прямоугольника, вырезанного в окрестности центра тяжести элемента оболочки, а в таблице 13.6-4 приведены правила чтения напряжений и усилий.

### Объемные конечные элементы

Если не задана система координат выдачи напряжений, то для конечных элементов типов 31 (параллелепипед), 33 и 35 (треугольные призмы) усилия вычисляются в местной системе координат, а для элементов типов 32, 34, 36, 37 и 38 — в общей (глобальной) системе координат (разд. 0). Элементы типа 31, 33 и 35 имеют местную систему координат (рис. 13.6-20), в которой:

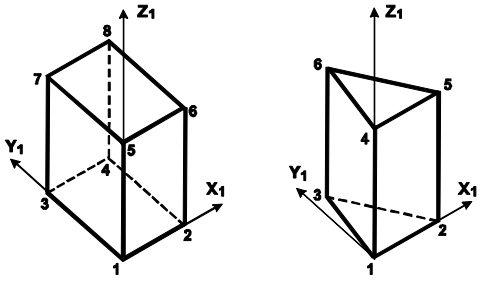



Рис. 13.6-20.

- ось $X_1$ направлена от узла 1 к узлу 2;
- ось $Y_1$ лежит в плоскости, образованной первыми тремя узлами и направлена в сторону третьего узла;
- ось $Z_1$ образует с $X_1$ и $Y_1$ правую тройку.

Для конечных элементов объемной задачи теории упругости напряжения по умолчанию вычисляются только в их центрах тяжести. Используя возможности графического ввода, можно заказать вычисление напряжений также в узлах элементов.

При этом вычисляются нормальные $N_X$, $N_Y$, $N_Z$ и касательные $T_{XY}$, $T_{XZ}$, $T_{YZ}$ напряжения.

На рис. 13.6-21 показаны положительные направления напряжений, наименования осей, вдоль которых они направлены, и плоскостей, в которых они действуют. В таблице 13.6-5 приведены правила чтения результатов, причем в скобках даны обозначения парных напряжений. По умолчанию для элементов типов 31, 33 и 35 напряжения рассматриваются относительно местной системы координат $X_1Y_1Z_1$, а для элементов типа 32, 34, 36, 37 и 38 — относительно глобальной системы координат XYZ.

**Таблица 13.6-5**

| Обозначение силового фактора | Размерность в базовых единицах | Описание | Положительный знак усилия |
|---|---|---|---|
| $N_X$ | Т/м$^2$ | Нормальное напряжение, действующее вдоль оси $X_1$ | Определяет растяжение |
| $N_Y$ | Т/м$^2$ | Нормальное напряжение, действующее вдоль оси $Y_1$ | Определяет растяжение |
| $N_Z$ | Т/м$^2$ | Нормальное напряжение, действующее вдоль оси $Z_1$ | Определяет растяжение |
| $T_{XY}$ | Т/м$^2$ | Сдвигающее напряжение, действующее в плоскости, параллельной $X_1OY_1$ | |
| $T_{XZ}$ ($T_{ZX}$) | Т/м$^2$ | Сдвигающее напряжение, действующее в плоскости, параллельной $X_1OZ_1$ | |
| $T_{YZ}$ ($T_{ZY}$) | Т/м$^2$ | Сдвигающее напряжение, действующее в плоскости, параллельной $Y_1OZ_1$ | |

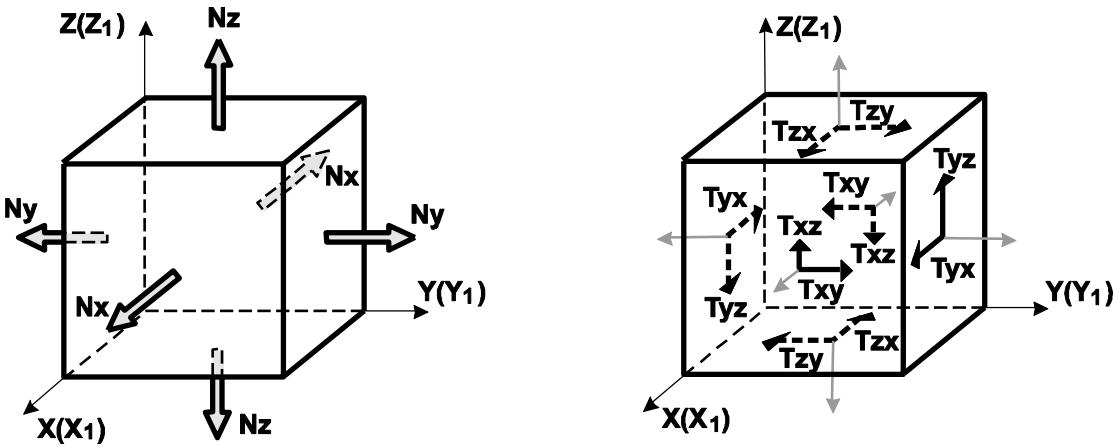



Рис. 13.6-21.

## Многослойные элементы оболочки

Данные конечные элементы применяются для пластин средней толщины или слоистой структуры (см. разд. 3.7), когда требуется учесть:

- деформации поперечного сдвига, обжатие слоев и кривизну (элементы типов 71–80);
- межслоевые сдвиги и кривизну (элементы типов 81–90).

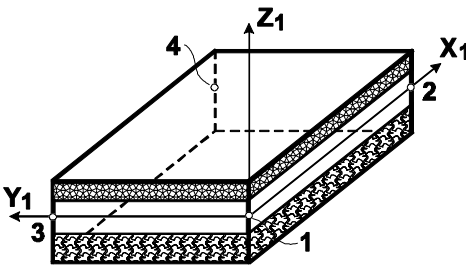



Рис. 13.6-22.

Поскольку описать нелинейный характер изменения перемещений по толщине пакета слоев в системе привычных шести степеней свободы в узле не удается, добавляются шесть их аналогов ($A_X$, $A_Y$, $A_Z$ , $B_X$, $B_Y$, $B_Z$ — для типов 71–80 и $A_X$, $A_Y$, $A_Z$ , $C_X$, $C_Y$, $C_Z$ — для типов 81–90). Каждый узел имеет 12 степеней свободы.

Местная система координат многослойных оболочек строится так же, как и для однослойных:

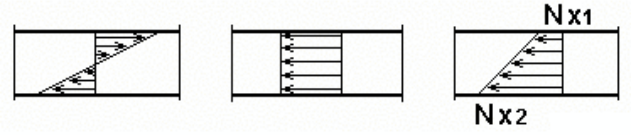
- ось $X_1$ направлена от узла 1 (начало КЭ) в узел 2;
- ось $Y_1$ перпендикулярна $X_1$ и направлена в сторону узла 3 (для прямоугольника — в узел 3);
- ось $Z_1$ перпендикулярна плоскости элемента и направлена от узла 1 так, чтобы образовалась правая система координат.

Для каждого слоя на верхней и нижней его границах в центре тяжести (а если задано, то и в узловых точках) в результате расчета определяются величины, приведенные в таблице 13.6-6.

**Таблица 13.6-6**

| Обозначение силового фактора | Размерность в базовых единицах | Описание | Положительный знак усилия |
|---|---|---|---|
| $N_X$ | Т/м$^2$ | Напряжение на плоскости нижней или верхней поверхности слоя, действующее вдоль оси $X_1$ | Определяет растяжение |
| $N_Y$ | Т/м$^2$ | То же, вдоль оси $Y_1$ | Определяет растяжение |
| $N_Z$ | Т/м$^2$ | Нормальное к поверхности слоя напряжение, действующее вдоль оси $Z_1$ | Определяет растяжение |
| $T_{XY}$ | Т/м$^2$ | Сдвигающее напряжение, действующее в плоскости, параллельной $X_1OY_1$ | |
| $T_{XZ}$ | Т/м$^2$ | Сдвигающее напряжение, действующее в плоскости, параллельной $X_1OZ_1$ | |
| $T_{YZ}$ | Т/м$^2$ | Сдвигающее напряжение, действующее в плоскости, параллельной $Y_1OZ_1$ | |
| $W_Z$ | мм | Величины горизонтальных перемещений и прогибов по направлениям осей общей системы координат | Положительные перемещения совпадают с направлениями оси Z |

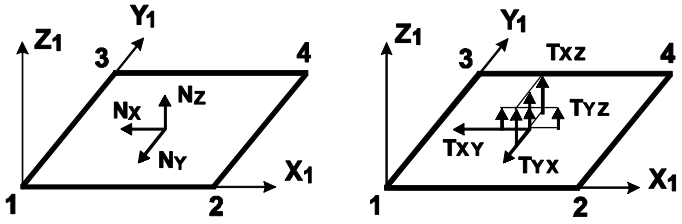
Напряжения $N_X$, $N_Y$, $T_{XY}$ направлены параллельно плоскостям слоя и местным осям $X_1$ и $Y_1$, их можно трактовать как напряжения от мембранной и изгибной групп усилий в этом слое. Так, например, напряжения $N_X$ (рис. 13.6-23, *в*) являются суммарными напряжениями от изгибающего момента $M_Y$ (рис. 13.6-23, *а*) и продольной силы $N_X$ (рис. 13.6-23, *б*) в этом слое, а $T_{XY}$ — суммарными от крутящего момента $M_{XY}$ и силы сдвига $T_{XY}$.




*а*) *б*) *в*)

Рис. 13.6-23.

Напряжения $N_Z$, $T_{XZ}$, $T_{YZ}$ направлены перпендикулярно плоскостям слоя и параллельно оси $Z_1$; Nz характеризует обжатие слоев по вертикали, а $T_{XZ}$ и $T_{YZ}$ являются мерой интенсивности перерезывающих сил $Q_X$ и $Q_Y$ в этом слое.




*а*) *б*)

Рис. 13.6-24.

Положительные направления напряжений для верхней плоскости слоя показаны на рис. 13.6-24, причем на рис. 13.6-24, *а* показаны положительные направления нормальных, а на рис. 13.6-24, *б* — сдвигающих напряжений. Для нижней плоскости направление $N_Z$ меняется на обратное.

## Осесимметричные конечные элементы

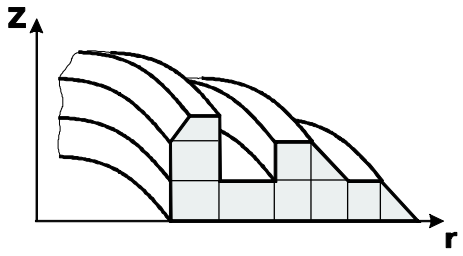



Рис. 13.6-25.

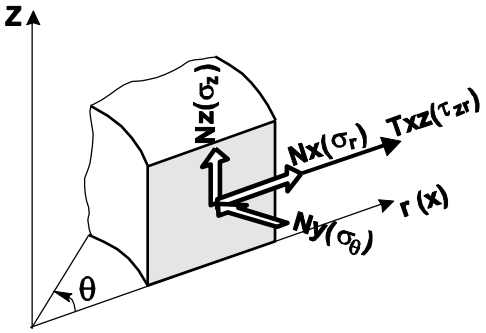



Рис. 13.6-26.

Эти элементы предназначены для определения напряженно-деформированного состояния тел вращения, находящихся под воздействием осесимметричной нагрузки (разд. 3.6).

Поперечное сечение тела разбивается на элементы и описывается в системе координат rOZ, где каждый узел имеет 2 степени свободы по направлениям осей r и Z (рис. 13.6-25). Величины перемещений узлов, а также напряжения вычисляются в общей системе координат rOZ.

На рисунке 13.6-26 показаны положительные направления напряжений, а в таблице 13.6-7 приведены правила их чтения.

**Таблица 13.6-7**

| Обозначение силового фактора | Размер-ность в базовых единицах | Описание | Положительный знак усилия определяет |
|---|---|---|---|
| $N_X$ ($\sigma_r$) | Т/м$^2$ | Напряжение, действующее в плоскости элемента и направленное вдоль оси r | Растяжение |
| $N_Z$ ($\sigma_z$) | Т/м$^2$ | То же, вдоль оси Z | Растяжение |
| $T_{XZ}$ ($\tau_{zr}$) | Т/м$^2$ | Касательное напряжение | Касательное напряжение в плоскости сечения |
| $N_Y$ ($\sigma_\theta$) | Т/м$^2$ | Напряжение, нормальное к плоскости элемента | Растяжение |

## Специальные конечные элементы

К специальным конечным элементам (разд. 3.8) отнесены: «нуль-элемент» (КЭ типа 154); элементы, моделирующие упругие связи в узлах и между узлами (типы 51 и 55), а также двухузловой и одноузловой законтурные элементы упругого основания (типы 53 и 54).

### *«Нуль-элемент» общего вида (тип 154)*

В «нуль-элементе» (рис. 13.6-27) вычисляются усилия в местной системе координат, правила образования которой полностью совпадают с системой координат стержневых элементов.

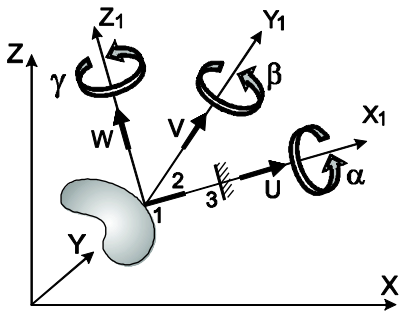



Рис. 13.6-27.

Несмотря на то, что местные оси элемента строятся аналогично стержню, «нуль-элемент» не стоит путать со стержнем. Он «приспосабливается» к заданному типу схемы, автоматически учитывая число степеней свободы, задаваемых жесткостных характеристик и вычисляемых усилий.

В таблице 13.6-8 приведен список вычисляемых усилий для различных типов схемы, которые фактически являются реакциями в первом его узле.

**Таблица 13.6-8**

| Тип схемы | Усилие | | Направление действия усилия* | Положительный знак усилия определяет* |
|---|---|---|---|---|
| | Индекс | Размерность | | |
| 1, 2, 4, 5, 8, 9, 11 | $R_X$ | Т | Вдоль оси $X_1$ | Совпадение с направлением оси $X_1$ |
| 4, 5, 8, 9 | $R_Y$ | Т | Вдоль оси $Y_1$ | Совпадение с направлением оси $Y_1$ |
| 1, 2, 4, 5, 8, 9, 11 | $R_Z$ | Т | Вдоль оси $Z_1$ | Совпадение с направлением оси $Z_1$ |
| 5, 8, 9 | $R_{UX}$ | Тм | Вокруг оси $X_1$ | Вращение по часовой стрелке, если смотреть с конца оси $X_1$ |
| 5, 8, 9 | $R_{UY}$ | Тм | Вокруг оси $Y_1$ | Вращение по часовой стрелке, если смотреть с конца оси $Y_1$ |
| 5, 8, 9 | $R_{UZ}$ | Тм | Вокруг оси $Z_1$ | Вращение по часовой стрелке, если смотреть с конца оси $Z_1$ |
| 8, 9, 11 | $R_{AX}$ | Т | Вдоль оси $X_1$ | Совпадение с направлением оси $X_1$ |
| 8, 9 | $R_{AY}$ | Т | Вдоль оси $Y_1$ | Совпадение с направлением оси $Y_1$ |
| 8, 9 | $R_{AZ}$ | Т | Вдоль оси $Z_1$ | Совпадение с направлением оси $Z_1$ |
| 8 | $R_{BX}$ | Тм | Вокруг оси $X_1$ | Вращение по часовой стрелке, если смотреть с конца оси $X_1$ |
| 8 | $R_{BY}$ | Тм | Вокруг оси $Y_1$ | Вращение по часовой стрелке, если смотреть с конца оси $Y_1$ |

| Тип схемы | Усилие | | Направление действия усилия* | Положительный знак усилия определяет* |
|---|---|---|---|---|
| 8 | $R_{BZ}$ | Тм | Вокруг оси $Z_1$ | Вращение по часовой стрелке, если смотреть с конца оси $Z_1$ |
| 9 | $R_{CX}$ | Т | Вдоль оси $X_1$ | Совпадение с направлением оси $X_1$ |
| 9 | $R_{CY}$ | Т | Вдоль оси $Y_1$ | Совпадение с направлением оси $Y_1$ |
| 9 | $R_{CZ}$ | Т | Вдоль оси $Z_1$ | Совпадение с направлением оси $Z_1$ |
| * Для элементов, моделирующих упругие связи (тип 51 — всегда и тип 55 — при условии совпадения координат узлов), направление действия усилий и положительный знак усилий определяются в общей системе координат. | | | | |

## Элементы, моделирующие упругие связи (тип 51, 55)

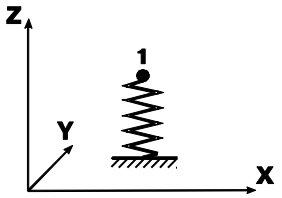



Рис. 13.6-28.

***Элемент типа 51*** (рис. 13.6-28) моделирует связи конечной жесткости по направлениям степеней свободы его единственного узла (в общей системе координат).

В результате расчета вычисляются усилия (реакции в пружинах), соответствующие степеням свободы, по направлениям которых введены связи конечной жесткости ($R_X$, $R_Y$, $R_Z$, $R_{UX}$, $R_{UY}$, $R_{UZ}$). Правила чтения для них приведены в таблице 13.6-8. При моделировании, например, упругого основания это будет отпор грунта по заданному направлению.

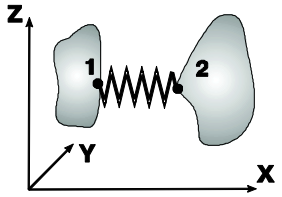



Рис. 13.6-29.

***Элемент типа 55*** (рис. 13.6-29) предназначен для учета податливости материала между двумя узлами.

В результате расчета вычисляются компоненты реакции ($R_X$, $R_Y$, $R_Z$, $R_{UX}$, $R_{UY}$, $R_{UZ}$) в общей или местной (в случае ее задания) системах координат. Предполагается, что данные реакции являются внешними воздействиями системы на первый узел элемента. Правила чтения для них приведены в таблице 13.6-8. При этом

- в общей системе координат знак выдаваемого усилия меняется при изменении порядка нумерации узлов элемента;
- в местной системе координат знак продольной реакции $R_X$ не зависит от порядка нумерации узлов элемента и положительное ее значение можно интерпретировать как сжатие элемента.

Если элемент имеет нулевую длину (совпадают координаты узлов), реакции всегда выдаются в общей системе координат.

### *Элементы, моделирующие законтурное упругое основание (тип 53, 54)*

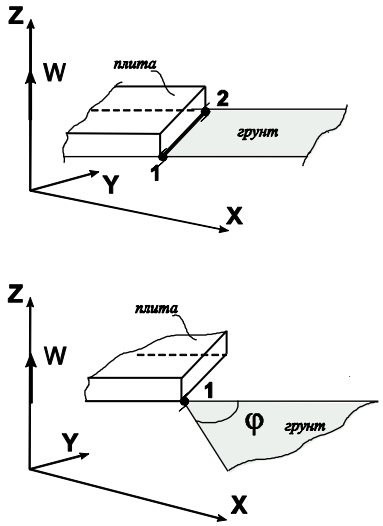



Рис. 13.6-30.

***Элементы типов 53 и 54*** (рис. 13.6-30) применяются для моделирования отпора полосы и угловой зоны грунта за пределами плиты и перпендикулярной ее контуру (за счет работы грунта на сдвиг). При этом учитывается работа грунта только в направлении оси Z.

В результате расчета вычисляется отпор грунта $R_Z$ в узлах элемента, которые считаются его сечениями. Отпор грунта является узловой реакцией и показывает, какую часть воздействия может воспринять полоса грунта за пределами плиты. Правила чтения результатов приведены в таблице 13.6-8. Положительная величина $R_Z$ означает сжатие грунта.

## 13.7. Реакции в связях

В комплексе **SCAD** предусмотрена возможность выдачи величин реакций в узлах, имеющих связи. Для вычисления реакций в связях необходимо активировать маркер **Вычислять реакции в связях** в окне **Параметры расчета**.

Положительные значения реакций в связях направлены в сторону, противоположную положительным значениям соответствующих компонент узловой нагрузки (активных сил).

Таблицы с реакциями формируются в **Документаторе** и аналогичны форме таблиц со значениями усилий.

## 13.8. Собственные колебания

В таблицах для каждой из учтенных в динамическом загружении форм колебаний конструкции всегда указывается частота этой формы. При необходимости могут быть также показаны относительные величины ординат по направлениям степеней свободы в узлах (в общей системе координат), а также эквивалентные статике воздействия в виде динамических нагрузок (T), приложенных в узлы расчетной схемы.

### *Собственные значения, частоты, периоды колебаний*

На рисунке 13.8-1 приведен пример вывода собственных значений, частот и периодов колебаний для нескольких динамических загружений рассматриваемой задачи. В каждой строке последовательно указывается номер загружения, порядковый номер формы колебаний, вычисленные для этой формы собственные значения, частоты и периоды, а также процент накопленных модальных масс по направлениям. В строке, отмеченной индексом S, в графе *Форма* приводятся накопленные в рассматриваемом загружении суммарные значения модальных масс.

**Частоты собственных колебаний**
Условные обозначения: S - Сумма модальных масс

| Частоты собственных колебаний | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Загружение | Форма | Собств. значение | Частота | | Периоды (сек) | Модальные массы (%) | | |
| | | | 1/сек | ГЦ | | Mx | My | Mz |
| 12 | 1 | 0,386 | 2,591 | 0,413 | 2,424 | 79,733 | 0 | 0 |
| 12 | 2 | 0,125 | 8,013 | 1,276 | 0,784 | 10,459 | 0 | 0 |
| 12 | 3 | 0,07 | 14,231 | 2,266 | 0,441 | 3,669 | 0 | 0 |
| 12 | S | | | | | 93,861 | 100 | 0 |
| 13 | 1 | 0,386 | 2,591 | 0,413 | 2,424 | 79,733 | 0 | 0 |
| 13 | 2 | 0,125 | 8,013 | 1,276 | 0,784 | 10,459 | 0 | 0 |
| 13 | 3 | 0,07 | 14,231 | 2,266 | 0,441 | 3,669 | 0 | 0 |
| 13 | S | | | | | 93,861 | 100 | 0 |
| 14 | 1 | 0,329 | 3,037 | 0,484 | 2,068 | 79,729 | 0 | 0 |
| 14 | 2 | 0,106 | 9,4 | 1,497 | 0,668 | 10,473 | 0 | 0 |
| 14 | 3 | 0,06 | 16,714 | 2,661 | 0,376 | 3,669 | 0 | 0 |
| 14 | S | | | | | 93,87 | 100 | 0 |
| 15 | 1 | 0,329 | 3,037 | 0,484 | 2,068 | 79,729 | 0 | 0 |
| 15 | 2 | 0,106 | 9,4 | 1,497 | 0,668 | 10,473 | 0 | 0 |
| 15 | 3 | 0,06 | 16,714 | 2,661 | 0,376 | 3,669 | 0 | 0 |
| 15 | S | | | | | 93,87 | 100 | 0 |

Рис. 13.8-1. *Частоты собственных колебаний*

### Собственные формы

Для каждой из учитываемых форм собственных колебаний в таблицах приводятся соотношения между величинами амплитуд в узлах расчетной схемы по каждой степени свободы в узле. Наибольшая величина амплитуды назначается 1000, значения остальных величин амплитуд определяются в долях от 1000. Таблицы с формами собственных колебаний и их минимаксными значениями полностью аналогичны соответствующим таблицам, формируемым при выводе перемещений.

### Распределение весов масс

Распределение весов масс (рис. 13.8-2) указывает, например, как были распределены массы конструкции в узлах сосредоточения. Форма таблиц распределения весов масс аналогична форме таблиц перемещений.

**Распределение весов масс**
Единицы измерения: Т, м
Параметры выборки:
Список узлов/элементов: Все
Список загружений/комбинаций: Все
Список факторов: Все

| Распределение весов масс | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Узел | Загружение | Значение | | | | | |
| | | $P_X$ | $P_Y$ | $P_Z$ | $P_{UX}$ | $P_{UY}$ | $P_{UZ}$ |
| 5 | 12 | 25,982 | 0 | 25,982 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 13 | 25,982 | 0 | 25,982 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 14 | 19,184 | 0 | 19,184 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 15 | 19,184 | 0 | 19,184 | 0 | 0 | 0 |

Рис. 13.8-2. *Распределение весов масс*

### Ускорения

Ускорения в узлах расчетной схемы при выполнении динамических расчетов выводятся в таблицах, форма которых представлена на рисунке 13.8-3.

**Ускорения**
Единицы измерения: мм/сек$^2$
Параметры выборки:
Список узлов/элементов: 562-600
Список загружений/комбинаций: Все
Список факторов: Все

| Ускорения | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Узел | Загружение | Номер формы | Значение | | | |
| | | | $a_x$ | $a_y$ | $a_z$ | $a_{sum}$ |
| 562 | 13 | RD1 | 0,007 | 0,003 | -8,344e-005 | 0,008 |
| 562 | 13 | RI1 | 4,465e-005 | 2,949e-005 | -7,783e-006 | 5,407e-005 |
| 562 | 13 | S1 | 0,007 | 0,003 | 8,38e-005 | 0,008 |
| 563 | 13 | RD1 | 0,009 | 0,002 | 0,002 | 0,01 |
| 563 | 13 | RI1 | 4,867e-005 | 2,605e-005 | 4,719e-006 | 5,54e-005 |
| 563 | 13 | S1 | 0,009 | 0,002 | 0,002 | 0,01 |
| 564 | 13 | RD1 | 0,009 | 0,004 | 0,005 | 0,011 |

Рис. 13.8-3. *Фрагмент таблицы «Ускорения»*

Здесь $a_x$, $a_y$, $a_z$ — ускорения по направлениям осей x, y, z общей системы координат соответственно, $a_{\text{sum}} = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}$ .

## 13.9. Расчетные сочетания усилий (РСУ)

Постпроцессор РСУ выбирает те сочетания отдельных загружений, которые могут быть наиболее опасными для каждого из сечений проверяемых элементов расчетной схемы. Выбор каждого сочетания определяется своим критерием прочности. Усилия (напряжения), соответствующие найденным опасным сочетаниям, используются постпроцессорами **SCAD** и программами-сателлитами (**Кристалл**, **АРБАТ**) для учета требований соответствующих норм к элементам стальных и железобетонных конструкций. На рис. 13.9-1 приведен пример печати РСУ.

В графах таблицы содержится следующая информация:

- **УНГ** — шифр унифицированной группы;
- **Номер элемента**;
- **Номер сечения**, для которого выбрано сочетание;
- **СТ** — номер столбца коэффициентов, на которые умножались усилия (напряжения) каждого из загружений при включении в текущее сочетание;
- **Критерий (КРТ)** — номер критерия (№) и его значение, по которому выбиралось данное сочетание. Номера критериев и формулы для вычисления их величин приведены в главе 18;
- **Вид** — тип конструкции по табл. П.4.1 Норм проектирования атомных станций НП-031-01 (см. главу 18);
- **Значение** (усилия и напряжения) — графы со значениями силовых факторов текущего сочетания;
- **Тип** (сочетания) — в этой графе идентификаторы **C, CL, N, NL** определяют, какого типа сочетание содержится в строке (C — расчетные; CL — расчетные длительно действующие, N — нормативные, NL — нормативные длительно действующие);
- **КС** (крановые, сейсмические, специальные, транспортные) — символы, записанные в этом столбце обозначают:
  - **Cr** — в сочетание вошли загружения от крановых воздействий;
  - **Se** — в сочетание вошло загружение от сейсмического воздействия;
  - **Sp** — в сочетание вошло особое загружение;
  - **Tr** — в сочетание вошли загружения от транспортных средств;
  - **пробел** — в сочетание не вошли загружения с воздействиями от кранов, сейсмики, ...;
- **Формула** — выражение, показывающее порядковые номера загружений и комбинаций загружений, которые вошли в текущее сочетание, и коэффициенты, с которыми они учтены.

**РСУ с автоматическим выбором коэффициентов**
Единицы измерения: Т, м
Параметры выборки:
Список узлов/элементов: 9263
Список факторов: Все
Список типов комбинаций: Все
Условные обозначения:
С - расчетные;
CL - расчетные длительно действующие;
N - нормативные;
NL - нормативные длительно действующие;
Se - сейсмические;
Cr - крановые;
Sp - специальные;
Tr - транспортные.

| РСУ с автоматическим выбором коэффициентов | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| УНГ | Элем. | Сеч. | СТ | Крит. | Вид | Значение | | | Тип | КС | Формула |
| | | | | | | N | $M_y$ | $Q_z$ | | | |
| -- | 67 | 1 | 1 | 1 | 1 | -0,758 | -1,234 | 0,801 | C | | L1 +L2 |
| -- | 67 | 1 | 1 | 1 | 1 | -0,758 | -1,234 | 0,801 | CL | | L1 +L2 |
| -- | 67 | 1 | 1 | 1 | 1 | -0,454 | -1,111 | 0,721 | N | | 0,909*L1 +0,952*L2 |
| -- | 67 | 1 | 1 | 1 | 1 | -0,454 | -1,111 | 0,721 | NL | | 0,909*L1 +0,952*L2 |

Рис. 13.9-1. *Фрагмент таблицы «Расчетные сочетания усилий» (РСУ)*

Если при вычислении РСУ задана унификация, то в начале таблицы печатаются результаты для групп унификации. Для обозначения унифицированных групп в графе УНГ приняты следующие правила:

- первая цифра обозначает вид унификации;
- вторая цифра — номер унифицированной группы.

Далее печатается информация о сочетаниях с указанием номеров элементов, которые были установлены как наиболее опасные по указанному критерию для всех элементов группы унификации. На рис. 13.9-2 показан фрагмент таблицы сочетаний для элементов, входящих в унифицированную группу 1.

| РСУ с автоматическим выбором коэффициентов | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| УНГ | Элем. | Сеч. | СТ | Крит. | Вид | Значение | | | Тип | КС | Формула |
| | | | | | | N | $M_y$ | $Q_z$ | | | |
| 2-5 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | -2,154 | -4,614 | 1,73 | C | | L1 +L2 |
| 2-5 | 2 | 1 | 1 | 2 | 1 | -3,782 | -8,25 | 3,156 | C | | C1 |
| 2-5 | 2 | 1 | 1 | 23 | 1 | -2,185 | -7,602 | 2,554 | C | | L1 +L2 +L4 |
| 2-5 | 2 | 1 | 1 | 24 | 1 | -3,75 | -5,262 | 2,333 | C | | L1 +L2 +L3 |

Рис. 13.9-2. *Фрагмент таблицы сочетаний с унифицированной группой*

Если в качестве нормативного документа по вычислению комбинаций нагрузок выбран EN 1990, то вычисляются следующие невыгодные комбинации: фундаментальные, аварийные, аварийные при пожаре, послеаварийные, сейсмические, характеристические, частные и квазипостоянные. Для фундаментальных комбинаций[1] приводятся детальные данные о том, по какой формуле EN 1990 производился расчет. При этом в графе **Тип** (сочетаний) могут фигурировать следующие идентификаторы:

**F** - Фундаментальная комбинация (формула (6.10))
**Fa** - Фундаментальная комбинация (формула (6.10.a))
**Fb** - Фундаментальная комбинация (формула (6.10.b))
**A** - Аварийная комбинация (формула (6.11a))
**Af** - Аварийная комбинация при пожаре (формула (6.11b))
**PA** - Послеаварийная комбинация (формула (6.11))

[1] Здесь и далее англоязычный термин *fundamental combination* переведен как *фундаментальная комбинация*. Следует отметить, что в различных переводах этого термина используются различные варианты. Например, основные сочетания (ТКП EN 1990), основные комбинации (СП РК EN 1990), базовые комбинации (изданное МГСУ Руководство для проектировщиков к Еврокоду).

**S** - Сейсмическая комбинация (формула (6.12))
**CH** - Характеристическая комбинация (формула (6.14))
**FR** - Частая комбинация (формула (6.15))
**QP** - Квазипостоянная комбинация (формула (6.16))

## 13.10.РСУ при анализе прогрессирующего обрушения

Назначение граф таблицы со значениями расчетных сочетаний при анализе прогрессирующего обрушения совпадает с графами таблицы РСУ. На рис. 13.10-1 показан фрагмент таблицы сочетаний.

| РСУ для прогрессирующего обрушения | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| УНГ | Элем. | Сеч. | СТ | Крит. | Вид | Значение | | | | | | | | | Тип | КС | Формула |
| | | | | | | $N_X$ | $N_Y$ | $\tau_{XY}$ | $M_X$ | $M_Y$ | $M_{XY}$ | $Q_X$ | $Q_Y$ | $R_z$ | | | |
| -- | 1805 | 1 | 1 | 0 | 1 | 6,561 | 17,611 | 3,559 | -0,068 | -0,023 | 0,14 | 0,474 | 0,202 | 0 | C | | L1 |
| -- | 1805 | 1 | 1 | 0 | 1 | 6,561 | 17,611 | 3,559 | -0,068 | -0,023 | 0,14 | 0,474 | 0,202 | 0 | CL | | L1 |
| -- | 1806 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1,7 | 10,996 | 8,062 | -0,142 | 0,029 | 0,149 | -0,408 | -0,475 | 0 | C | | L1 |
| -- | 1806 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1,7 | 10,996 | 8,062 | -0,142 | 0,029 | 0,149 | -0,408 | -0,475 | 0 | CL | | L1 |
| -- | 1807 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1,258 | 7,624 | 9,47 | -0,238 | -0,022 | 0,109 | -0,828 | -0,095 | 0 | C | | L1 |
| -- | 1807 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1,258 | 7,624 | 9,47 | -0,238 | -0,022 | 0,109 | -0,828 | -0,095 | 0 | CL | | L1 |

Рис. 13.10-1. *Фрагмент таблицы расчетных сочетаний для анализа прогрессирующего обрушения*

## 13.11.Расчетные сочетания реакций в связях

Назначение граф таблицы со значениями расчетных сочетаний реакций в связях совпадает с графами таблицы РСУ. На рис. 13.11-1 показан фрагмент таблицы сочетаний.

**Расчетные сочетания реакций в связях**
Единицы измерения: Т, м
Параметры выборки:
Список узлов/элементов: 1 6 г 10 2
Список типов комбинаций: Все
Условные обозначения:
C - расчетные;
CL - расчетные длительно действующие;
N - нормативные;
NL - нормативные  длительно действующие;
Se - сейсмические;
Cr - крановые;
Sp - специальные;
Tr - транспортные.

| Расчетные сочетания реакций в связях | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Узел | СТ | Крит. | Значение | | | | | | Тип | КС | Формула |
| | | | $R_X$ | $R_Y$ | $R_Z$ | $R_{UX}$ | $R_{UY}$ | $R_{UZ}$ | | | |
| 6 | 1 | 4 | -11,878 | -8,811 | 47,23 | 27,901 | -35,464 | 1,849 | C | | L1 +0,9*L16 +L18 +0,95*L23 +L24 +0,7*L28 |
| 6 | 1 | 4 | -4,12 | -2,838 | 53 | 9,22 | -12,244 | 0,624 | CL | | L1 +0,315*L16 +0,35*L18 +0,95*L23 +L24 +0,245*L28 |
| 6 | 1 | 4 | -9,888 | -7,317 | 43,623 | 23,204 | -29,506 | 1,541 | N | | 0,909*L1 +0,75*L16 +0,833*L18 +0,792*L23 +0,833*L24 +0,583*L28 |
| 6 | 1 | 4 | -3,422 | -2,34 | 48,432 | 7,637 | -10,157 | 0,521 | NL | | 0,909*L1 +0,262*L16 +0,292*L18 +0,792*L23 +0,833*L24 +0,204*L28 |
| 6 | 1 | 5 | -6,156 | -9,741 | 58,269 | 31,174 | -16,55 | 2,398 | C | | L1 +0,95*L2 +L18 +0,9*L19 +L22 +0,95*L25 +0,7*L27 |
| 6 | 1 | 5 | 1,403 | -3,659 | 62,361 | 12,123 | 5,895 | 1,129 | CL | | L1 +0,95*L2 +0,35*L18 +0,315*L19 +L22 +0,95*L25 +0,245*L27 |

Рис. 13.11-1. *Фрагмент таблицы «Расчетные сочетания реакций в связях»*

Для расчетных сочетаний реакций в связях принята следующая нумерация критериев:

| № | Критерий | № | Критерий | № | Критерий | № | Критерий |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | *max* $R_X$ | 2 | *min* $R_X$ | 3 | *max* $R_Y$ | 4 | *min* $R_Y$ |
| 5 | *max* $R_Z$ | 6 | *min* $R_Z$ | 7 | *max* $R_{UX}$ | 8 | *min* $R_{UX}$ |
| 9 | *max* $R_{UY}$ | 10 | *min* $R_{UY}$ | 11 | *max* $R_{UZ}$ | 12 | *min* $R_{UZ}$ |
| 13 | $max\sqrt{R_X^2 + R_Y^2 + R_Z^2}$ | | | 14 | $max\sqrt{R_X^2 + R_Y^2}$ | | |
| 15 | $max\sqrt{R_{UX}^2 + R_{UY}^2 + R_{UZ}^2}$ | | | 16 | $max\sqrt{R_{UX}^2 + R_{UY}^2}$ | | |

## 13.12. Расчетные сочетания перемещений (РСП)

Назначение граф таблицы с расчетными сочетаниями перемещений аналогично таблицам РСУ. Общий вид этих таблиц приведен на рисунке 13.12-1.

**РСП с автоматическим выбором коэффициентов**
Единицы измерения: мм, град
Параметры выборки:
Список узлов/элементов: 1125-1135
Список типов комбинаций: Все
Условные обозначения:
N - нормативные;
NT - нормативные временные;

| РСП с автоматическим выбором коэффициентов | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Узел | Крит. | Значение | | | Тип | Формула |
| | | X | Y | Z | | |
| 1126 | 4 | -0,048 | -0,003 | -0,113 | N | 0,909*L1 +0,833*L18 +0,833*L22 +0,75*L28 |
| 1126 | 5 | -0,037 | -0,002 | -0,097 | N | 0,909*L1 +0,833*L18 |
| 1126 | 8 | -0,046 | -0,003 | -0,112 | N | 0,909*L1 +0,833*L18 +0,833*L22 |
| 1126 | 1 | 0,078 | 0,003 | -16,646 | NT | 0,792*L2 +0,833*L17 +0,75*L19 +0,833*L23 +0,583*L27 |
| 1126 | 2 | 0,015 | 0,001 | 0,027 | NT | 0,833*L17 |
| 1126 | 3 | 0,024 | 0,002 | 0,038 | NT | 0,833*L17 +0,75*L19 +0,583*L27 |
| 1126 | 4 | -0,042 | -0,003 | -0,07 | NT | 0,833*L18 +0,833*L22 +0,75*L28 |
| 1126 | 5 | -0,031 | -0,002 | -0,054 | NT | 0,833*L18 |

Рис. 13.12-1. *Фрагмент таблицы «Расчетные сочетания перемещений» (РСП)*

Для расчетных сочетаний перемещений принята следующая нумерация критериев:

| № | Критерий | № | Критерий | № | Критерий | № | Критерий |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | *max* X | 2 | *min* X | 3 | *max* Y | 4 | min Y |
| 5 | *max* Z | 6 | *min* Z | 7 | $max\sqrt{X^2+Y^2+Z^2}$ | | |
| 8 | $max\sqrt{X^2+Y^2}$ | | | | | | |

## 13.13. Расчетные сочетания прогибов

Назначение граф таблицы с расчетными сочетаниями прогибов аналогично таблицам РСУ. Общий вид таблицы приведен на рисунке 13.13-1.

**Расчетные сочетания прогибов**
Единицы измерения: мм
Параметры выборки:
Список узлов/элементов: 1932 1933
Список типов комбинаций: Все
Условные обозначения:
N - нормативные;
NT - нормативные временные;

| Расчетные сочетания прогибов | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Элем. | Сеч. | СТ | Крит. | Значение | | | Тип | Формула |
| | | | | X | Y | Z | | |
| 1932 | 1 | 1 | 2 | -0,019 | 0,013 | -0,049 | N | L1 +0,95*L2 +L3 +L5 +L6 +L24 |
| 1932 | 1 | 1 | 4 | -0,02 | 0,007 | -0,042 | N | L1 +L2 +L3 +0,95*L24 |
| 1932 | 1 | 1 | 6 | -0,02 | 0,013 | -0,052 | N | L1 +L2 +L3 +L5 +L6 +0,95*L23 +0,95*L24 |
| 1932 | 1 | 1 | 7 | -0,021 | 0,008 | -0,044 | N | L1 +L2 +L3 +0,95*L23 +0,95*L24 |
| 1932 | 1 | 1 | 2 | -0,019 | 0,013 | -0,049 | NT | 0,95*L2 +L3 +L5 +L6 +L24 |
| 1932 | 1 | 1 | 4 | -0,02 | 0,007 | -0,042 | NT | L2 +L3 +0,95*L24 |

Рис. 13.13-1. *Фрагмент таблицы «Расчетные сочетания прогибов»*

Для расчетных сочетаний прогибов действуют те же критерии, что и для РСП (см. раздел 13.12).

## 13.14.Расчетные сочетания продавливания

Назначение граф таблицы с расчетными сочетаниями продавливания аналогично таблицам РСУ. Общий вид этих таблиц приведен на рисунке 13.14-1.

**Расчетные сочетания продавливания**
Единицы измерения:
- Силы: Т
- Единицы длины для силовых факторов: м

Параметры выборки:
Список узлов/элементов: Все
Условные обозначения:
Se - сейсмические;
Cr - крановые;
Sp - специальные;
Tr - транспортные.

| Расчетные сочетания продавливания | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Узел | СТ | Крит. | Значение | | | | | | Тип | КС | Формула |
| | | | $R_X$ | $R_Y$ | $R_Z$ | $R_{UX}$ | $R_{UY}$ | $R_{UZ}$ | | | |
| 32 | 1 | 1 | 8,408 | -3,159 | 136,979 | 9,56 | 28,912 | 0,001 | С | | 0,833*L7 +0,909*L10 +C1 |
| 32 | 1 | 2 | 7,612 | -2,841 | 123,672 | 8,558 | 26,169 | 0,001 | С | | 0,909*L1 +0,833*L6 +0,909*L10 |

Рис. 13.14-1. *Фрагмент таблицы «Расчетные сочетания продавливания»*

Для расчетных сочетаний продавливания принята следующая нумерация критериев:

| № | Критерий | № | Критерий | № | Критерий | № | Критерий |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | *max* $R_X$ | 2 | *min* $R_X$ | 3 | *max* $R_Y$ | 4 | *min* $R_Y$ |
| 5 | *max* $R_Z$ | 6 | *min* $R_Z$ | 7 | *max* $R_{UX}$ | 8 | *min* $R_{UX}$ |
| 9 | *max* $R_{UY}$ | 10 | *min* $R_{UY}$ | 11 | *max* $R_{UZ}$ | 12 | *min* $R_{UZ}$ |
| 13 | $max\sqrt{R_X^2+R_Y^2+R_Z^2}$ | 14 | $max\sqrt{R_X^2+R_Y^2}$ | 15 | $max\sqrt{R_{UX}^2+R_{UY}^2+R_{UZ}^2}$ | 16 | $max\sqrt{R_{UX}^2+R_{UY}^2}$ |

## 13.15.Нагрузки от фрагмента схемы

**Нагрузки от фрагмента схемы**
Единицы измерения: Т, м
Параметры выборки:
Список узлов/элементов: 32-46
Список загружений/комбинаций: 1, 2
Список факторов: Все

| Нагрузки от фрагмента схемы | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Узел | Загружение | Значение | | | | | |
| | | $R_X$ | $R_Y$ | $R_Z$ | $R_{UX}$ | $R_{UY}$ | $R_{UZ}$ |
| 32 | 1 | 1,09 | -3,246 | 91,56 | 10,562 | 4,853 | 7,284e-005 |
| 32 | 2 | -0,06 | -0,096 | 8,111 | 0,314 | -0,068 | 8,911e-006 |
| 33 | 1 | 0,618 | -5,216 | 151,262 | 16,193 | 1,611 | 7,831e-005 |
| 33 | 2 | -0,097 | -0,306 | 13,818 | 0,875 | -0,32 | 8,784e-006 |
| 34 | 1 | 0,348 | -5,395 | 158,927 | 16,863 | 1,418 | 9,516e-005 |

Рис. 13.15-1. *Фрагмент таблицы «Нагрузки от фрагмента схемы»*

Форма выдачи результатов расчета нагрузок от фрагмента схемы (рис. 13.15-1) аналогична таблице с перемещениями узлов. Принятые в таблице условные обозначения:

- $R_X$, $R_Y$, $R_Z$ — линейные нагрузки в узле по соответствующим направлениям;
- $R_{UX}$, $R_{UY}$, $R_{UZ}$ — моменты в узле.

В тех случаях, когда нагрузки вычислялись для комбинаций загружений, в таблицах вместо номеров загружений выводятся номера комбинаций. Правило знаков соответствует правилу знаков задания узловых нагрузок (см. разд. 8.1).

## 13.16.Нагрузки продавливания

Форма выдачи результатов расчета нагрузок продавливания (рис. 13.16-1) аналогична таблице с нагрузками от фрагмента схемы. Принятые в таблице условные обозначения:

- $R_X$, $R_Y$, $R_Z$ — линейные нагрузки в узле по соответствующим направлениям;
- $R_{UX}$, $R_{UY}$, $R_{UZ}$ — моменты в узле.

**Нагрузки продавливания**
Единицы измерения:
- Силы: Т
- Единицы длины для силовых факторов: м

Параметры выборки:
Список узлов/элементов: Все
Список загружений/комбинаций: Все
Список факторов: Все

| Нагрузки продавливания | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Узел | Загружение | Номер формы | Значение | | | | | |
| | | | $R_X$ | $R_Y$ | $R_Z$ | $R_{UX}$ | $R_{UY}$ | $R_{UZ}$ |
| 32 | 1 | | 4,195 | -1,576 | 68,203 | 4,752 | 14,419 | 3,219e-004 |
| 32 | 2 | | 0,253 | -0,075 | 5,168 | 0,229 | 0,909 | 2,406e-005 |
| 32 | 3 | | 0,14 | -0,056 | 1,546 | 0,19 | 0,462 | 4,613e-006 |

Рис. 13.16-1. *Фрагмент таблицы «Нагрузки продавливания»*

В тех случаях, когда нагрузки вычислялись для комбинаций загружений, в таблицах вместо номеров загружений выводятся номера комбинаций. Правило знаков соответствует правилу знаков задания узловых нагрузок.

## 13.17.Анализ устойчивости

В зависимости от настройки постпроцессора анализа устойчивости, по результатам расчета для каждого статического загружения или комбинации загружений могут быть сформированы следующие таблицы с результатами:

- коэффициенты запаса устойчивости;
- формы потери устойчивости;
- свободные длины стержневых элементов.

### *Коэффициенты запаса устойчивости*

В одноименной таблице (пример — таблица 13.17-1) для каждого загружения (или комбинации загружений), для которого выполнялся анализ устойчивости системы, приводится значение коэффициента, а в тех случаях, когда вычислить коэффициент запаса устойчивости не удалось — причина, по которой возникла подобная ситуация.

**Таблица 13.17-1**

| Коэффициенты запаса устойчивости | | |
|---|---|---|
| **Номер** | **Наименование загружения/комбинации** | **Значение** |
| 2 | Снег | 0.0647 |
| 3 | Полезная кратковременная-1 | Коэффициент запаса > 2.0000 |
| 9 | Полезная длительная-3 | Коэффициент запаса > 2.0000 |
| 11 | Ветер против оси OY (давление) | 0.0978 |
| 12 | Ветер по оси OY (отсос) | 0.0877 |
| 15 | Ветер против оси OX (давление) | 0.1254 |
| 16 | Ветер по оси OX (отсос) | 0.0997 |

### *Формы потери устойчивости*

В таблицах с формами потери устойчивости приводятся соотношения между величинами амплитуд в узлах расчетной схемы по каждому загружению или комбинации. Наибольшая величина амплитуды назначается равной единице, значения остальных величин амплитуд определяются в долях единицы.

Таблицы вывода форм потери устойчивости и их минимаксных значений полностью аналогичны таблицам вывода перемещений.

Формы потери устойчивости можно просмотреть в графическом постпроцессоре, где они выводятся в разделе **Перемещения** под идентификатором $S_i$ или $SC_i$ (для комбинаций), где $i$ — номер загружения.

### Свободные длины стержневых элементов

Результаты вычисления свободных длин стержневых элементов для каждого статического загружения (или комбинации загружений) оформляются в виде таблицы (см. таблицу 13.17-2). В ней указывается номер элемента, его тип, номера принадлежащих ему узлов и одно (для плоских схем) или два (для пространственных схем) значения свободной длины $L_{Z1}$ и $L_{Y1}$, которые соответственно обозначают свободную длину в плоскости выпучивания стержня $X_1OY_1$ и $X_1OZ_1$. Если стержень растянут и понятие свободной длины лишено смысла, то вместо свободных длин выводится строка ***.

**Таблица 13.17-2**

| Свободные длины элементов | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Элемент | Тип элемента | Узел №1 | Узел №2 | Загружение | $L_{Y1}$ | $L_{Z1}$ |
| 1 | 5 | 12 | 14 | 1 | 4,025 | 4,025 |
| 2 | 5 | 14 | 15 | 1 | 10,051 | 8,92 |
| 3 | 5 | 15 | 16 | 1 | 11,01 | 9,772 |
| 4 | 5 | 16 | 17 | 1 | 20,215 | 17,941 |
| 5 | 5 | 17 | 18 | 1 | 24,739 | 21,956 |

## 13.18. Главные и эквивалентные напряжения

Таблицы с результатами расчета главных и эквивалентных напряжений (рис. 13.18-1 и 13.18-2) строятся по тому же принципу, что и таблицы усилий и напряжений (разд. 13.5). Кроме того, для каждого стержневого элемента после номера сечения указывается номер характерной точки, к которой относятся вычисленные значения (положение характерных точек для каждого вида поперечного сечения см. в главе 26 **Главные и эквивалентные напряжения**). Для элементов оболочек и плит в графе «Точка» указывается номер слоя, в котором производились вычисления (1 — нижний; 2 — средний; 3 — верхний).

**Главные и эквивалентные напряжения по усилиям**
Единицы измерения: Т, м
Параметры выборки:
Список узлов/элементов: 1
Список загружений/комбинаций: Все
Список факторов: Все

| Главные и эквивалентные напряжения по усилиям | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Элемент | Сечение | Точка | Загружение | Значение | | | | | | |
| | | | | $N_X$ | $\tau_{XY}$ | $\tau_{XZ}$ | $\sigma_1$ | $\sigma_3$ | $\sigma_{E04}$ | $\sigma_{S04}$ |
| 1 | 1 | 1 | 1 | -340,736 | 0 | 0 | 0 | -340,736 | 340,736 | 340,736 |
| 1 | 1 | 2 | 1 | 1917,598 | 0 | 0 | 1917,598 | 0 | 1917,598 | 1917,598 |
| 1 | 1 | 3 | 1 | -68,44 | 0 | 0 | 0 | -68,44 | 68,44 | 68,44 |
| 1 | 1 | 4 | 1 | -2326,775 | 0 | 0 | 0 | -2326,775 | 2326,775 | 2326,775 |
| 1 | 1 | 5 | 1 | -1333,756 | 0 | 36,62 | 1,005 | -1334,76 | 1335,263 | 1335,263 |
| 1 | 1 | 6 | 1 | 924,579 | 0 | 163,918 | 952,779 | -28,201 | 967,188 | 967,188 |
| 1 | 1 | 7 | 1 | 788,431 | -180,889 | 0 | 827,951 | -39,52 | 848,402 | 848,402 |
| 1 | 1 | 8 | 1 | -1197,607 | -53,592 | 0 | 2,393 | -1200,001 | 1201,199 | 1201,199 |

Рис. 13.18-1. *Фрагмент таблицы «Главные и эквивалентные напряжения»*

**Выборка главных и эквивалентных напряжений по усилиям**
Единицы измерения: кН, м
Параметры выборки:
Список узлов/элементов: Все
Список загружений/комбинаций: Все
Список факторов: Все

| Выборка главных и эквивалентных напряжений по усилиям | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Наименование | Максимальные значения | | | | | Минимальные значения | | | | |
| | Значение | Элемент | Сечение | Точка | Загружение | Значение | Элемент | Сечение | Точка | Загружение |
| $N_X$ | 74247,315 | 19 | 3 | 1 | 1 | -77032,788 | 19 | 3 | 1 | 3 |
| $\tau_{XY}$ | 9173,815 | 106 | 1 | 2 | 1 | -14575,805 | 106 | 1 | 2 | 2 |
| $\tau_{XZ}$ | 10643,325 | 106 | 1 | 1 | 5 | -13217,817 | 106 | 3 | 1 | 6 |
| $\sigma_1$ | 74247,315 | 19 | 3 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| $\sigma_3$ | 0 | 1 | 1 | 1 | 2 | -77032,788 | 19 | 3 | 1 | 3 |
| $\sigma_{E04}$ | 77032,788 | 19 | 3 | 1 | 3 | 0,002 | 141 | 2 | 5 | 3 |
| $\sigma_{S04}$ | 77032,788 | 19 | 3 | 1 | 3 | 0,002 | 141 | 2 | 5 | 3 |

Рис. 13.18-2. *Таблица «Выборка главных и эквивалентных напряжений по усилиям»*

В качестве «силовых» факторов в таблице (в зависимости от типа элемента, исходных данных и напряженно-деформированного состояния) выводятся следующие величины:[1]

- главные напряжения (Т/м$^2$) — $\sigma_1$, $\sigma_2$, $\sigma_3$;
- углы Эйлера (рад) — TETA, PSI и FI;
- коэффициент Лоде-Надаи — MU;
- нормальное напряжение в характерных точках поперечного сечения стержня (Т/м$^2$) — $N_X$;
- касательные напряжения в характерных точках поперечного сечения стержня (Т/м$^2$) — $\tau_{XY}$, $\tau_{XZ}$;
- эквивалентные напряжения, приведенные к эквивалентному растяжению по одной из четырех теорий прочности (Т/м$^2$) — $\sigma_{E1}$, $\sigma_{E2}$, $\sigma_{E3}$, $\sigma_{E4}$;
- эквивалентные напряжения, приведенные к эквивалентному сжатию по одной из четырех теорий прочности (Т/м$^2$) — $\sigma_{S1}$, $\sigma_{S2}$, $\sigma_{S3}$, $\sigma_{S4}$.

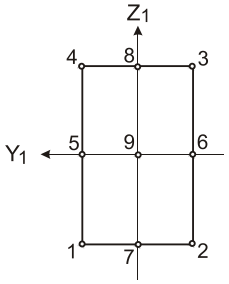



Рис. 13.18-3.

На рис. 13.18-1 показаны результаты расчета главных и эквивалентных напряжений для стержня прямоугольного сечения. На рис. 13.18-3 приведен пример размещения характерных точек в таком сечении. Номера этих точек даются в графе «Точка».

Для конечного элемента оболочки под номером точки следует понимать слой, в котором производились вычисления — нижний (1), средний (2), верхний (3).

## 13.19. Результаты экспертизы элементов железобетонных и стальных конструкций, а также подбора арматуры и сечений элементов стального проката

Структура таблиц с результатами подбора арматуры в стержневых и пластинчатых элементах описана в главе 19. Там же приведена информация об управлении формированием отчета по результатам экспертизы заданной арматуры. Аналогичная информация, но по результатам экспертизы элементов стальных конструкций, дана в главе 20.

[1] Единицы измерений приведены в базовых единицах

# 14. Монтаж

Режим **Монтаж** предназначен для моделирования поведения конструкции (определения ее напряженно-деформированного состояния) в процессе возведения (см. разд. 2.7). Процесс возведения сооружения и, соответственно, расчет разбивается на несколько этапов (стадий монтажа). Расчет каждого следующего этапа выполняется с учетом напряженно-деформированного состояния конструкции, определенного по результатам расчета предыдущих этапов. При переходе от одной стадии к другой в программе предусмотрена возможность включения и исключении из модели элементов конструкции, учет различного вида статических и динамических нагрузок, изменение модуля упругости материала, условий примыкания и опирания. По результатам расчета могут быть получены расчетные сочетания усилий, комбинации загружений, выполнен подбор арматуры в элементах железобетонных конструкций, а также проверка и подбор сечений прокатных профилей в элементах стальных конструкций.

Расчетная схема может быть подготовлена заранее в виде стандартного проекта (файл с расширением **.spr**) или сформирована непосредственно в режиме **Монтаж** (файл проекта с расширением **.mpr**). При необходимости корректировку геометрии и характеристик элементов и узлов расчетной схемы можно провести в режиме **Монтаж** аналогично стандартному режиму подготовки данных.

## 14.1. Создание проекта

При создании нового проекта в диалоговом окне **Новый проект** (рис. 14.1-1) необходимо активировать маркер **Монтаж**.

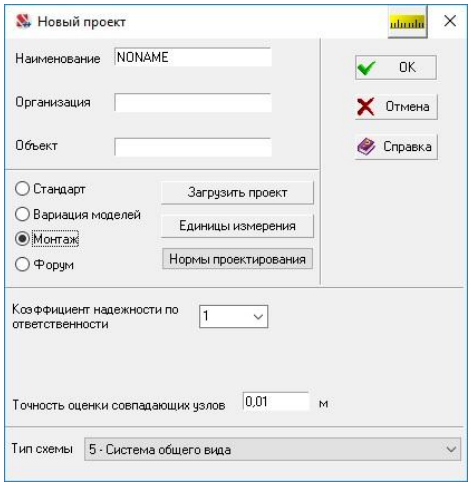



Рис. 14.1-1. *Диалоговое окно* **Новый проект** (активен маркер **Монтаж)**

Если расчетная схема была создана заранее в виде стандартного проекта, то ее выбор выполняется в диалоговом окне **Открыть**, которое появляется после нажатия кнопки **Загрузить проект**. Выбранный стандартный проект необходимо сохранить в качестве проекта режима **Монтаж**. Это выполняется в стандартном окне **Сохранить как …**, которое будет загружено после выхода из диалогового окна нажатием кнопки **ОК**.

Следует помнить, что файл режима **Монтаж** (с расширением **.mpr**) должен иметь имя, отличное от имени файла стандартного проекта (с расширением **.spr**). В противном случае возникает ситуация, при которой файлы с результатами расчета стандартной задачи и задачи, моделирующей процесс монтажа, будут иметь одинаковое имя, а значит, одна задача в процессе расчета будет замещать результаты другой.

На любой стадии монтажа возможен экспорт из формата **.mpr** в формат **.spr**. В этом случае в стандартной модели будут учтены все элементы, условия примыкания и опирания, а также нагрузки, описанные на заданной стадии монтажа.

При создании нового проекта для режима **Монтаж** первая стадия монтажа будет создана автоматически с нулевым числом включенных элементов. Имя первой стадии необходимо будет задать дополнительно.

## 14.2. Инструментальная панель Монтаж

Раздел инструментальной панели **Монтаж** (рис. 14.2-1) будет доступен только при загрузке проекта с расширением **.mpr**. При этом в инструментальной панели **Назначение** исчезает часть кнопок, например, задания связей, шарниров, коэффициентов постели.

В инструментальной панели предусмотрен следующий набор кнопок:

 — инициализация новой стадии монтажа;

 — корректировка параметров настройки стадии монтажа;

 — удаление стадии монтажа;

 — добавить элементы на текущей стадии монтажа;

 — удалить элементы на текущей стадии монтажа;

 — изменить модули упругости;

 — установить шарниры;

 — удалить шарниры;

 — назначить/удалить/изменить связи;

 — назначить/изменить коэффициенты постели;

 — вызов программы **Кросс** для расчета коэффициентов постели;

 — назначить/изменить объединение перемещений;

 — формирование списка загружений;

 — сохранить информацию о текущем этапе как отдельную (стандартную) задачу;

 — управление стадиями монтажа;

 — подтвердить и сбросить установленную операцию.

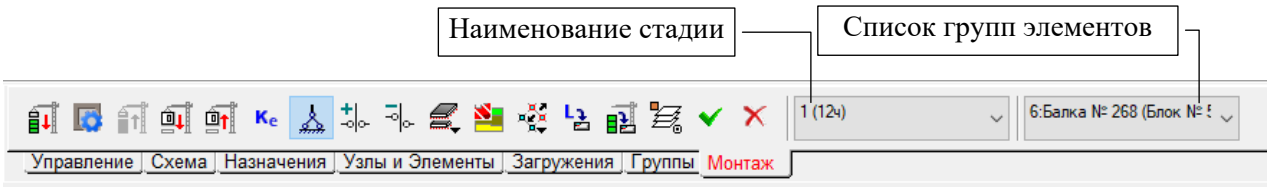



Рис. 14.2-1. *Инструментальная панель режима* **Монтаж**

Кнопки инструментальной панели становятся доступными по мере задания соответствующих данных для стадии монтажа. Обратите внимание на пиктограммы в кнопках. Стрелка вниз означает задание новой стадии монтажа или добавление элементов, а стрелка вверх — соответственно, их удаление.

Для создания очередной стадии монтажа рекомендуется следующий порядок действий:

- нажать кнопку  , после чего открывается диалоговое окно **Стадия монтажа**. Задать наименование стадии и, при необходимости выполнения расчетов по деформированной схеме, активировать соответствующий маркер;
- нажать кнопку  и указать группы добавляемых элементов или выбрать на схеме элементы, которые включаются на текущей стадии, после чего нажать кнопку  ;
- нажать кнопку  и указать группы исключаемых элементов или выбрать на схеме элементы, которые удаляются на текущей стадии, после чего нажать кнопку  ;
- если на текущем этапе меняется модуль упругости каких-либо элементов, то следует нажать кнопку  , ввести в диалоговом окне **Модуль упругости** значение коэффициента к

модулю упругости, заданному при описании жесткостных характеристик элементов, выбрать на схеме элементы или группы элементов, у которых меняется модуль, и нажать кнопку  ;

- если на текущем этапе меняются связи в узлах, то нажать кнопку  и выполнить операции по установке или удалению связей в выбранных узлах;
- если на текущем этапе меняются шарниры, то используя кнопки  ,  следует выполнить операции по установке или удалению шарниров в выбранных элементах;
- нажать кнопку  и задать в диалоговом окне **Формирование загружений** базовое (накапливаемое) загружение, включая, если это необходимо, группы нагрузок с соответствующими коэффициентами, а также независимые загружения, действующие на текущей стадии монтажа.

При необходимости текущее состояние расчетной схемы может быть сохранено в виде стандартной задачи —  (здесь под стандартной задачей подразумевается файл с расширением **.spr**, не связанный с режимом монтажа и имеющий имя, отличное от имени файла с расширением **.mpr**).

### Инициализация новой стадии монтажа



После нажатия этой кнопки на экране появляется диалоговое окно **Стадия монтажа** (рис. 14.2-2), в котором задается следующая информация:

- имя стадии;
- признак учета деформаций, полученных при расчете предыдущей стадии.

Независимо от состояния маркера **Учет деформированной схемы** узлы элементов, добавляемых на новой стадии монтажа и примыкающих к узлам элементов, установленных на предыдущей стадии, получают в процессе расчета координаты с учетом деформированной схемы (с учетом перемещений этих узлов, полученных при расчете предыдущей стадии монтажа).

Все остальные узлы ставятся в «проектное положение», соответствующее исходной схеме. Если маркер не активирован, то расчет напряженно-деформированного состояния выполняется с учетом этих перемещений, но без учета изменения формы элементов. В противном случае при расчете учитывается и изменение формы.

При создании каждой стадии монтажа следует также выбрать опции, определяющие порядок учета изменений модулей упругости и коэффициентов постели. Если жесткостные параметры элементов системы (модуль упругости или коэффициент постели упругого основания) меняются при переходе от одного этапа монтажа к другому, то это нетрудно учесть при задании схемы модификации конструкции. Но здесь можно представить себе два варианта этой операции:

- элемент приобрел новую жесткостную характеристику (например, увеличилась жесткость обжатого упругого основания) но при этом напряженно-деформированное состояние системы не изменилось (режим без пересчета напряженно-деформированного состояния);
- элемент поменял свою жесткостную характеристику, оставаясь нагруженным (например, упал модуль упругости сильно разогретого пожаром элемента), т. е. то внутреннее усилие, которое в нем было до модификации, передается обновленному элементу, и происходит перераспределение усилий в системе без изменения нагрузки (режим с пересчетом напряженно-деформированного состояния).

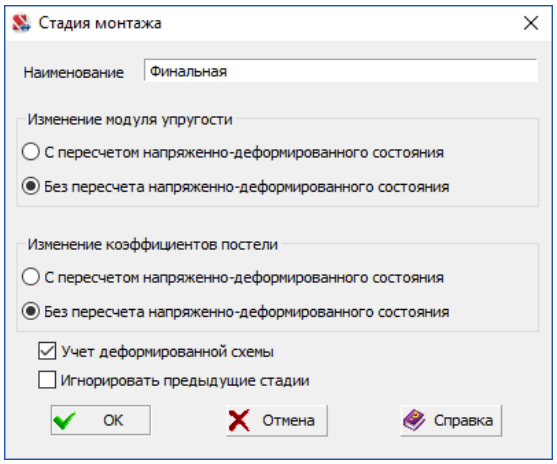



Рис. 14.2-2. *Диалоговое окно* **Стадия монтажа**

Очевидно, что первый вариант вряд ли применим при уменьшении жесткостной характеристики, когда обычно происходит перераспределение усилий в системе.

Если при увеличении жесткости основания как правило не требуется пересчета НДС, то при его уменьшении оно необходимо. Разделив элементы "будто бы" на два: оболочка и упругое основание, выделив реакции упругого основания из общих реакций и передав их обновленному элементу, учтем перераспределение усилий в системе без изменения нагрузки (режим *с пересчетом напряженно-деформированного состояния*).

Маркер **Игнорировать предыдущие стадии** позволяет выполнить расчет без учета напряженно-деформированного состояния конструкции, определенного по результатам расчета предыдущих стадий. Тем самым можно промоделировать несколько вариантов монтажа и получить расчетные сочетания, которые будут включать самые неблагоприятные варианты для всех стадий и всех вариантов монтажа (аналог **Вариации Моделей**).

После выхода из диалогового окна в списке стадий монтажа появляется новая запись (имя стадии) и все последующие операции, назначаемые в инструментальной панели **Монтаж**, будут относиться к этой стадии.

### Корректировка параметров настройки стадии монтажа



Если необходимо внести изменения в ранее назначенные параметры стадии (например, поменять имя первой стадии, которое по умолчанию автоматически назначается «1»), следует в выпадающем списке стадий монтажа инструментальной панели выбрать нужную стадию и нажать кнопку **Корректировка параметров настройки стадии Монтажа** —  . В появившемся диалоговом окне **Стадия монтажа** (рис. 14.2-2) внести корректировки и выйти по нажатию кнопки **ОК**.

### Удаление стадии монтажа



Для удаления стадии монтажа следует в выпадающем списке стадий монтажа инструментальной панели выбрать нужную стадию и нажать кнопку **Удаление стадии монтажа**. Если указано удаление не последней стадии, то удаляются и все стадии, следующие за ней (предварительно запрашивается согласие пользователя).

### Добавление элементов на текущей стадии монтажа



Для указания элементов, присоединяемых к конструкции на текущей стадии монтажа, следует после нажатия указанной кнопки выбрать на схеме необходимые элементы и нажать кнопку **ОК**. Элементы можно выбрать, непосредственно указывая их на схеме с помощью одного из курсоров

или путем указания имен групп элементов в выпадающем списке в инструментальной панели **Монтаж**. Присоединенные элементы перекрашиваются в цвет, показывающий, что элемент включен в одну из стадий монтажа. Таким образом, схема окрасится в два цвета: одним цветом — элементы, уже включенные на текущей стадии монтажа, а другим — еще не включенные.

Для отображения элементов, входящих в схему на текущей стадии монтажа используется кнопка фильтров  (см. разд. 10.2).

### Удалить элементы на текущей стадии монтажа



Для исключения элементов из текущей стадии следует после нажатия указанной кнопки выбрать на схеме снимаемые элементы и нажать кнопку **ОК** в инструментальной панели. Элементы перекрашиваются в цвет, отличный от цвета присоединенных элементов. При необходимости эти элементы могут добавляться в схему на других стадиях.

### Изменение модулей упругости для текущей стадии монтажа




Для изменения модуля упругости элементов при расчете текущей стадии монтажа следует активировать указанную операцию, ввести в появившемся диалоговом окне **Модуль упругости** (рис. 14.2-3) значение коэффициента и выйти из окна по кнопке **ОК**. Выбрать на схеме элементы, у которых меняется модуль на текущей стадии, и нажать кнопку **ОК**. Если группы элементов имеют разные значения модуля упругости, то для каждой группы надо повторить описанные выше действия.

При расчете текущей стадии монтажа назначенные коэффициенты будут использованы для изменения модулей упругости элементов, заданных при формировании исходной расчетной схемы. При активном маркере **Применить также ко всем последующим стадиям** заданные коэффициенты будут назначены и на всех последующих стадиях. Для просмотра значений коэффициентов изменения модулей упругости на стадиях монтажа необходимо включить соответствующую опцию на странице **Стадии монтажа** (рис. 14.2-4) диалогового окна **Настройка фильтров отображения информации** (см. разд. 10.2).

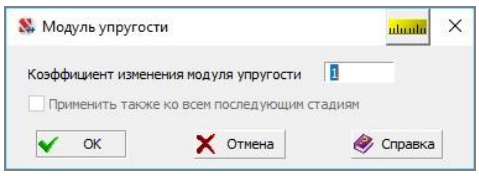



Рис. 14.2-3. *Диалоговое окно* **Модуль упругости**

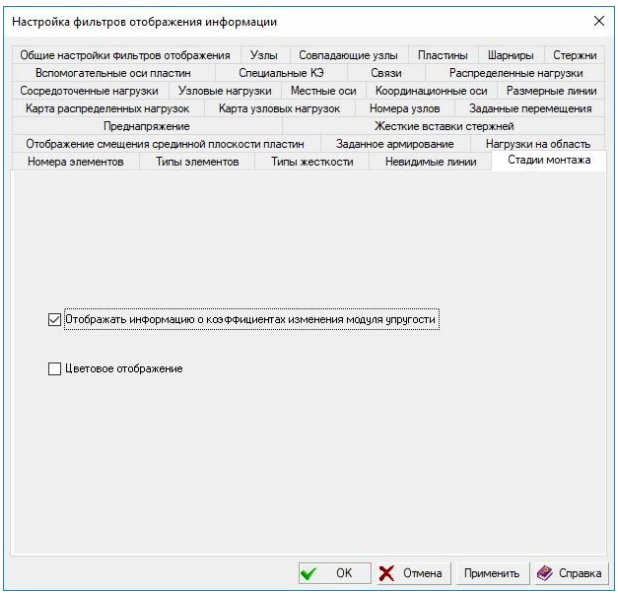



Рис. 14.2-4. *Страница* **Стадии монтажа** (**Настройка фильтров отображения информации**)

## Формирование списка загружений



В режиме **Монтаж** различают два вида загружений — накапливаемое (базовое) и независимые.

Накапливаемое загружение может быть только одно, оно действует на каждой стадии монтажа и учитывается в РСУ как постоянная нагрузка. В состав нагрузок накапливаемого загружения входят нагрузки от собственного веса, сюда же могут включаться нагрузки от складируемых в процессе монтажа материалов и т. п.

Независимые загружения, к которым относятся полезная нагрузка, ветер, сейсмика и другие динамические воздействия и т. п., могут действовать как на результирующую конструкцию, так и на различных этапах монтажа. В РСУ они выступают как самостоятельные загружения и могут иметь любой тип. Необходимо помнить, что к каждому независимому загружению будет автоматически добавлено базовое загружение. Т. е., если базовое загружение — собственный вес, то соответствующая снеговая нагрузка будет равна «снег + собственный вес».

Подготовка данных о загружениях предполагает следующее:

- все базовые нагрузки, действующие на одной стадии, заранее объединены в одно загружение (наличие такого загружения обязательно) и, если это необходимо, в ряд групп нагрузок. Например, если элементы конструкции выполнены из различных материалов с разными коэффициентами надежности по нагрузке (железобетон, сталь и т. п.), то можно собственный вес стальных конструкций представить в виде загружения, а других — в виде групп нагрузок с соответствующими коэффициентами;
- независимые нагрузки, действующие на каждой стадии монтажа, объединяются в загружения. Группы нагрузок для независимых загружений не предусмотрены;
- при наличии нагрузок определенного вида, действующих на всю (результирующую) схему, например, собственный вес, они могут быть заданы в виде одного загружения. На каждой стадии монтажа будут автоматически учтены только те нагрузки из этого загружения, которые приложены к существующим на данной стадии элементам и узлам.

После инициализации стадии монтажа и нажатия кнопки  появляется диалоговое окно **Формирование загружений** (рис. 14.2-5), которое включает три списка. Левый список содержит полный перечень всех загружений и групп нагрузок, сформированных на момент инициализации текущей стадии. В правый верхний список, оформленный в виде таблицы, из левого списка переносится загружение, которое является накапливаемым (напомним, что наличие такого загружения обязательно), а также группы нагрузок с соответствующими коэффициентами. В нижний список переносятся независимые загружения, действующие на текущей стадии монтажа.

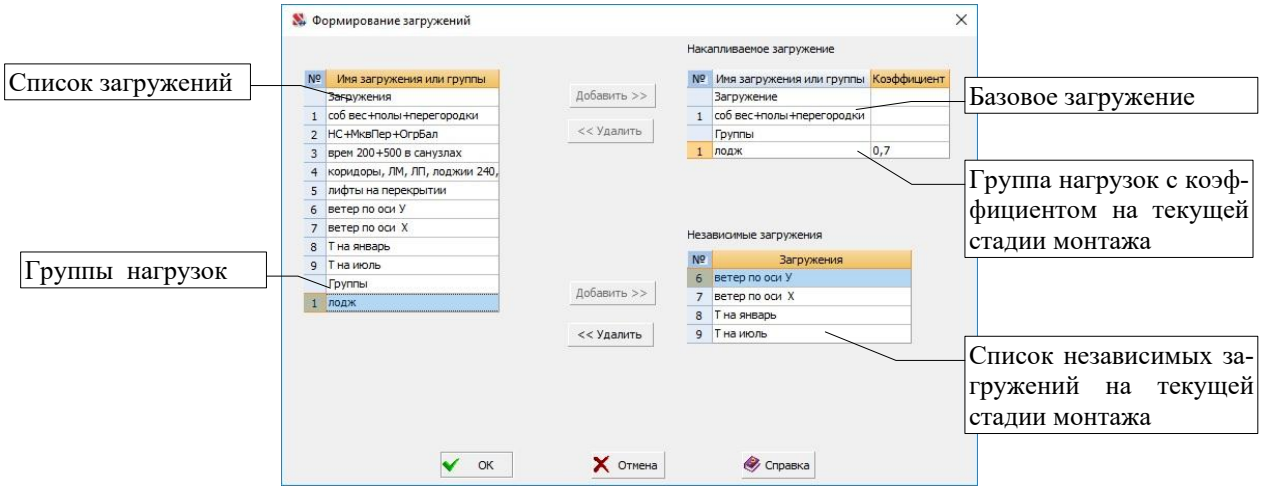



Рис. 14.2-5. *Диалоговое окно* **Формирование загружений**

Для переноса загружения (группы нагрузок) в правые таблицы следует отметить его в левой таблице и нажать соответствующую кнопку **Добавить**. Если операция была выполнена ошибочно,

то отмеченное в правом списке загружение или группа могут быть удалены нажатием одноименной кнопки.

Группы нагрузок вводятся с коэффициентами, значения которых записываются в соответствующем столбце таблицы. Суммирование загружения и групп нагрузок при формировании базового загружения производится по правилам, описанным в разделе 8.4. Как накапливаемое, так и независимые загружения всегда имеют коэффициент равный 1.

Последняя стадия монтажа рассматривается как эксплуатационная, т. е. на этой стадии в качестве независимых включаются все те загружения, которые обычно действуют на готовое сооружение. Сюда относятся полезные нагрузки, снег, ветер, динамические нагрузки, характерные для зданий и сооружений такого типа, и т. п.

### Назначение и корректировка связей



После выбора соответствующей стадии монтажа назначение и корректировка (в том числе и удаление) связей выполняется аналогично одноименной операции в режиме формирования расчетной схемы. Связи могут назначаться даже в те узлы, которые не примыкают к установленным элементам, потому что данная операция выполняется для текущей стадии и всех следующих за ней.

### Назначение шарниров в стержнях



Установка шарниров выполняется аналогично одноименной операции в режиме формирования расчетной схемы для текущей стадии и всех следующих за ней.

### Удаление шарниров в стержнях



Удаление шарниров выполняется аналогично одноименной операции в режиме формирования расчетной схемы для текущей и всех стадий монтажа, которые следуют за ней.

### Назначение и удаление шарниров в пластинах



Установка и удаление шарниров в пластинах выполняется аналогично одноименной операции в режиме формирования расчетной схемы для текущей и всех стадий монтажа, которые следуют за ней.

### Назначение и корректировка коэффициентов постели



Назначение и корректировка коэффициентов постели выполняется аналогично одноименной операции в режиме формирования расчетной схемы для текущей и всех стадий монтажа, которые следуют за ней.

### Назначение объединений перемещений



Назначение и корректировка объединений перемещений выполняется аналогично одноименной операции в режиме формирования расчетной схемы для текущей и всех стадий монтажа, которые следуют за ней.

### Сохранить информацию о текущем этапе как отдельную задачу



В этом случае текущее состояние проекта записывается как отдельный файл с расширением **.spr**. Запись идет через стандартное окно **Save as…(Сохранить как…)**.

### Управление стадиями монтажа



Операция используется для управления параметрами стадий монтажа и позволяет выполнить следующие действия: переименование стадий и установку параметров расчета на стадиях монтажа (расчет по деформированной схеме, пересчет напряженно-деформированного состояния при изменении модулей упругости и/или коэффициентов постели).

Операции выполняются в диалоговом окне (рис. 14.2-6), в котором находится таблица со списком стадий. Графы таблицы включают:

- **№** — номер стадии;
- **Имя** — имя стадии;
- Признак расчета по **деформированной схеме**;
- Признак пересчета напряженно-деформированного состояния при изменении **модулей упругости**;
- Признак пересчета напряженно-деформированного состояния при изменении **коэффициентов постели**.

Для переименования стадии следует установить курсор на имя нужной стадии и дважды нажать левую кнопку мыши. Строка таблицы становится доступной для редактирования.

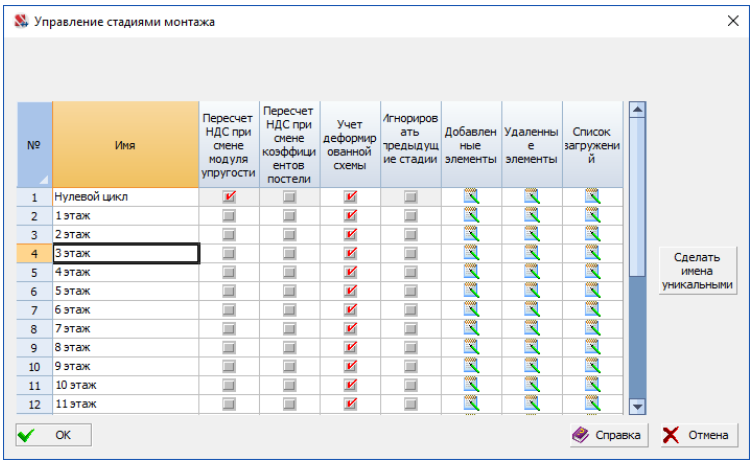



Рис. 14.2-6. *Диалоговое окно* **Управление стадиями монтажа**

Кнопки в столбцах **Добавленные элементы** и **Удаленные элементы** позволяют редактировать (в текстовом виде) списки добавленных/удаленных элементов для соответствующей стадии монтажа. Кнопки в столбце **Список загружений** позволяют формировать список загружений для каждой стадии монтажа (аналогично операции  ).

Если в расчетной схеме есть стадии с одинаковыми именами, то использование кнопки **Сделать имена уникальными** позволяет автоматически переименовать их путем добавления к имени суффикса № XXX.

### Создание и модификация основной схемы

В процессе работы в режиме **Монтаж** пользователь может как полностью создать расчетную схему «с нуля», так и модифицировать ее. Работа в разделах инструментальной панели **Управление**, **Схема**, **Назначение**, **Узлы и Элементы**, **Загружения** и **Группы** практически ничем не отличается

от работы с обычной схемой. Необходимо учесть следующие правила работы со схемой в режиме **Монтаж**:

- добавленные к расчетной схеме новые элементы не будут активированы на текущей стадии монтажа и всех последующих. Эту операцию следует выполнять по правилам, описанным выше (см. раздел **Добавление элементов на текущей стадии монтажа**);
- кнопки назначения связей, шарниров, объединения перемещений и коэффициентов постели действуют только в разделе **Монтаж** (в разделе **Назначение** они недоступны), с их помощью выполняются операции назначения только для текущей стадии монтажа;
- для указания элементов, включенных в схему на текущей стадии монтажа, предусмотрена кнопка на панели фильтров — **Показать элементы, включенные/не включенные на данной стадии монтажа**;
- для просмотра значений коэффициентов изменения модулей упругости на стадиях монтажа необходимо включить соответствующую опцию на странице **Стадии монтажа** (рис. 14.2-4) диалогового окна **Настройка фильтров отображения информации** (см. разд. 10.2).

## 14.3. Расчет

В режиме **Монтаж** в группе функций **Расчет** дерева проекта (рис. 14.3-1) появляется одноименный раздел. После активации этого раздела доступно стандартное окно комплекса **SCAD Параметры расчета**, в котором по описанным выше правилам (см. главу 11) назначаются параметры расчета.

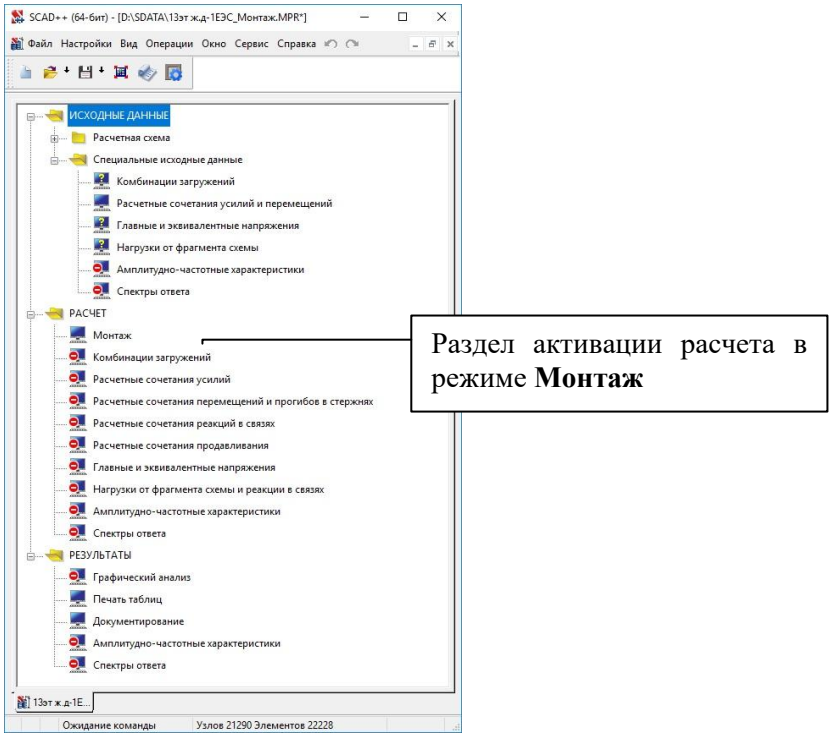



Рис. 14.3-1. *Дерево проекта в режиме* **Монтаж**

## 14.4. Анализ результатов

Анализ результатов расчета в режиме **Монтаж** выполняется в графическом постпроцессоре по тем же правилам, что и для стандартной модели (см. главу 12). Для каждого загружения в списке загружений дополнительно к параметрам, описанным ранее, указывается номер стадии монтажа (рис. 14.4-1, *а*).

После выбора из списка загружений в инструментальных панелях постпроцессора строки с наименованием нужной стадии монтажа изображение расчетной схемы меняется таким образом, что в рабочем поле остаются только те элементы, которые присутствуют в схеме на текущей стадии (рис. 14.4-1, *б*).

Следует помнить, что значения факторов для независимых загружений будут отображаться с учетом того, что их величина сформирована по формуле «независимое + базовое».

Дополнительно к описанным в разделе **Выбор загружения** (разд. 12.1) используются следующие обозначения для идентификации выводимой информации:

**LB + LS** – амплитуда от базовой и статической нагрузки (статический ветер) динамического загружения;

**LB + LS + SD** – амплитуда от базовой, статической и динамической составляющих динамического загружения;

**LB + S1, LN + S2, ...** – амплитуда от базовой, и динамической огибающей от действительной и мнимой составляющих динамического загружения;

**LB + T1, LN + T2, ...** – амплитуда от базовой и динамической составляющей в указанный момент времени.

*а*)




*б*)

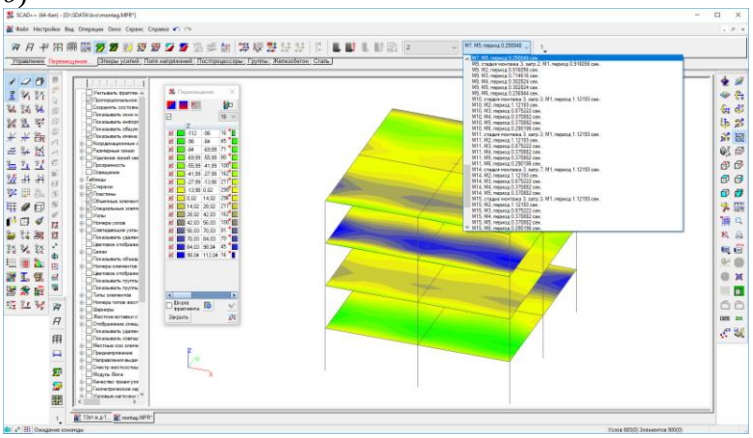


Рис. 14.4-1. *Закладка* **Перемещения**, *режим* **Анализ результатов**
*а*) список загружений, *б*) изополя перемещений на одной из стадий монтажа

### История по стадиям монтажа

Для контроля истории изменения напряженно-деформированного состояния (для накапливаемого загружения) элементов и узлов используется операция **История по стадиям монтажа**, которая вызывается из диалоговых окон **Информация об элементе** и **Информация об узле** соответственно.

## 14.5. Расчетные сочетания усилий

Расчетные сочетания усилий для режима **Монтаж** формируются с использованием постпроцессора РСУ. В этом постпроцессоре (см. главу 18) при назначении взаимосвязи загружений необходимо учитывать следующее:

- загружения, действующие на различных стадиях монтажа, автоматически объявляются взаимоисключающими. При этом в таблице взаимоисключений одноименного диалогового окна это не отображается;
- логику взаимодействия всех загружений, действующих на одной стадии монтажа, задает пользователь. При этом накапливаемое (базовое) загружение всегда имеет статус постоянного;
- для всех остальных загружений (кроме базового) при формировании РСУ учитывается только та их часть, на которую эти загружения были изменены путем сложения с базовым.

## 14.6. Расчет элементов стальных и железобетонных конструкций

Естественно, что расчет элементов стальных и железобетонных конструкций (экспертиза и подбор) следует выполнять для последней стадии монтажа. При этом будут учтены все неблагоприятные сочетания усилий, которые возникали на предыдущих стадиях. Поэтому для того, чтобы войти в постпроцессоры **Сталь** или **Железобетон** следует (например) на закладках *Перемещения* или *Усилия* выбрать загружение, которое соответствует последней стадии.

Расчет элементов стальных и железобетонных конструкций может быть выполнен также по результатам расчета для отдельных стадий монтажа. В этом случае необходимо выполнить следующие действия:

- в диалоговом окне **Расчетные сочетания усилий** отметить в качестве неактивных все загружения, которые относятся к стадиям монтажа, следующим за исследуемой;
- выполнить формирование РСУ;
- в исходных данных диалогового окна **Армирование** с помощью коэффициента условий твердения бетона откорректировать значение расчетного сопротивления бетона таким образом, чтобы эта величина соответствовала исследуемой стадии монтажа;
- выполнить подбор или проверку армирования в интересующих элементах схемы;
- выполнить подбор или проверку элементов стальных конструкций.

# 15. Прямое интегрирование уравнений движения

## 15.1. Постановка задачи

Особенностями данной постановки задачи является то, что перемещения, скорости и ускорения узлов конечно-элементной модели определяются в абсолютной системе отсчета, связанной с условно неподвижной землей. Сейсмическое воздействие задается как вынужденные смещения опор, поэтому входной информацией являются не акселерограммы, а сейсмограммы (зависимость перемещений от времени), получающиеся из акселерограмм двойным интегрированием по времени. Такой подход позволяет естественным образом решать задачи с асинхронным возмущением опор. Для получения виброграмм из заданных акселерограмм рекомендуется использовать **Редактор Акселерограмм SCAD**.

На рис. 15.1-1, 15.1-2 представлены соответственно традиционная постановка задачи в системе отсчета, связанной с абсолютно жестким подвижным основанием, и постановка задачи в абсолютной системе отсчета, используемая в **SCAD**.

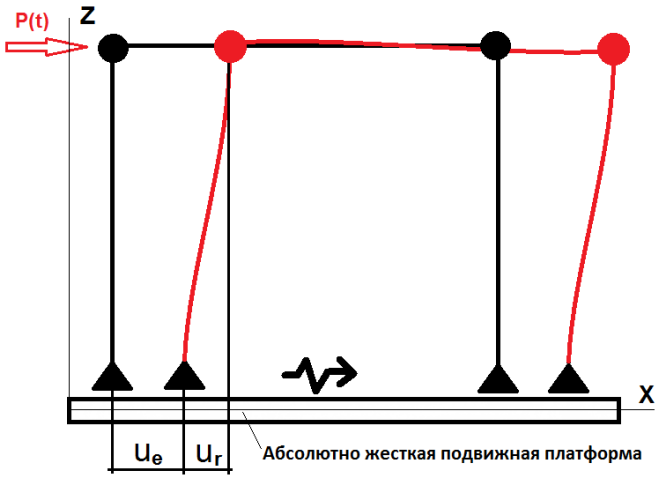



Рис. 15.1-1. *Решение задачи в относительной системе отсчета, связанной с абсолютно жесткой подвижной платформой, совершающей поступательное движение (классическая постановка)*

$$\begin{cases} \mathbf{u} = \mathbf{u}_e + \mathbf{u}_r; \\ \ddot{\mathbf{u}} = \ddot{\mathbf{u}}_e + \ddot{\mathbf{u}}_r; \\ \mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}_r + \mathbf{K}\mathbf{u}_r = -\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}_e(t) + \mathbf{p}(t) \end{cases}$$

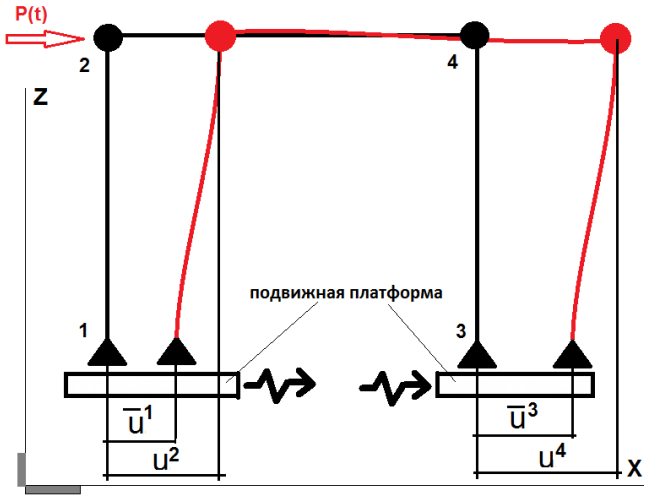



Рис. 15.1-2. *Решение задачи относительно условно неподвижной абсолютной системы отсчета (SCAD)*

Уравнения движения конечно-элементной (МКЭ) модели в абсолютно неподвижной системе отсчета представлены в виде:

$$\underbrace{\begin{pmatrix}\mathbf{M}_{11} & 0\\ 0 & \mathbf{M}\end{pmatrix}}_{\hat{\mathbf{M}}}\cdot\begin{pmatrix}\ddot{\bar{\mathbf{u}}}\\ \ddot{\mathbf{u}}\end{pmatrix}+\underbrace{\begin{pmatrix}\mathbf{K}_{11} & \mathbf{K}_{12}\\ \mathbf{K}_{21} & \mathbf{K}\end{pmatrix}}_{\hat{\mathbf{K}}}\cdot\begin{pmatrix}\bar{\mathbf{u}}\\ \mathbf{u}\end{pmatrix}+\underbrace{\begin{pmatrix}\mathbf{C}_{11} & \mathbf{C}_{12}\\ \mathbf{C}_{21} & \mathbf{C}\end{pmatrix}}_{\hat{\mathbf{C}}}\cdot\begin{pmatrix}\dot{\bar{\mathbf{u}}}\\ \dot{\mathbf{u}}\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}0\\ \mathbf{p}(t)\end{pmatrix},\tag{1}$$

где $\hat{\mathbf{K}},\hat{\mathbf{M}},\hat{\mathbf{C}}$ – соответственно матрицы жесткости, масс и диссипации, охватывающие степени свободы, подлежащие определению (вектор узловых значений неизвестных $\mathbf{u}$), а также известные перемещения в узлах – вынужденные смещения $\bar{\mathbf{u}}(t)$, $\mathbf{p}(t)$ – заданные силы.

Из выражения (1) следует:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}+\mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}+\mathbf{K}\mathbf{u}=-\mathbf{K}_{21}\bar{\mathbf{u}}(t)-\mathbf{C}_{21}\dot{\bar{\mathbf{u}}}(t)+\mathbf{p}(t),\tag{2}$$

Здесь в левой части уравнения находятся ускорения, скорости и перемещения, подлежащие определению, а в правой части – известные величины.

В настоящее время реализованы два различных подхода для учета диссипации. Первый подход основан на гипотезе Рэлея, а второй – на учете внутреннего сопротивления материала.

Согласно гипотезе Рэлея,

$$\hat{\mathbf{C}}=\alpha\cdot\hat{\mathbf{M}}+\beta\cdot\hat{\mathbf{K}},\tag{3}$$

где $\alpha$, $\beta$ – коэффициенты пропорциональности, причем слагаемое $\alpha\cdot\hat{\mathbf{M}}$ отвечает за демпфирование нижних мод, а слагаемое $\beta\cdot\hat{\mathbf{K}}$ – верхних. Такое представление предполагает возможность разделения системы уравнений при разложении нагрузки по формам собственных колебаний недемпфированной системы [1], [2].

Подставляя (3) в (2), получаем:

$$\mathbf{M}\left(\ddot{\mathbf{u}}+\alpha\cdot\dot{\mathbf{u}}\right)+\tilde{\mathbf{C}}\dot{\mathbf{u}}+\mathbf{K}\left(\mathbf{u}+\beta\cdot\dot{\mathbf{u}}\right)=-\mathbf{K}_{21}\left(\bar{\mathbf{u}}+\beta\cdot\dot{\bar{\mathbf{u}}}\right)-\tilde{\mathbf{C}}_{21}\dot{\bar{\mathbf{u}}}+\mathbf{p}(t).\tag{4}$$

Здесь $\mathbf{K}, \mathbf{M}$ – традиционные матрицы жесткости и масс, охватывающие только степени свободы, подлежащие определению, $\tilde{\mathbf{C}}$ – матрица диссипации, обусловленная локальными демпферами (см. раздел 1.6).

В случае не рэлеевского демпфирования (учет внутреннего сопротивления материала) матрица диссипации представляется так:

$$\mathbf{C} = \sum_{e=1}^{N_e} \gamma_e \mathbf{P}_e^T \mathbf{K}_e \mathbf{P}_e \,, \tag{5}$$

где суммирование выполняется по всем конечным элементам расчетной модели $N_e$, $\gamma_e$ – коэффициент внутреннего неупругого сопротивления материала, $\mathbf{K}_e$ – матрица жесткости конечного элемента $e$, $\mathbf{P}_e$ – матрица перестановок, выполняющая рассылку элементов матрицы жесткости $\mathbf{K}_e$ конечного элемента $e$ в позиции элементов глобальной матрицы жесткости $\mathbf{K}$. При этом матрица диссипации $\mathbf{C}$ является симметричной разреженной матрицей, имеющей ту же ненулевую структуру, что и матрица жесткости $\mathbf{K}$. Данный подход позволяет учесть многокомпонентное демпфирование, когда конечные элементы расчетной модели в случае разных материалов имеют различные значения $\gamma_e$. При этом матрица диссипации $\mathbf{C}$ не может быть представлена в виде линейной комбинации матриц $\mathbf{K}$ и $\mathbf{M}$, и применение метода разложения по формам собственных колебаний не приводит к разделению уравнений движения на отдельные несвязанные уравнения для каждой моды. Поэтому для решения задачи (2) мы применяем методы прямого интегрирования.

Подчеркнем, что одновременное задание рэлеевского демпфирования и не рэлеевского возможно только при использовании рэлеевского демпфирования и локальных демпферов. Одновременное использование рэлеевского демпфирования и модели диссипации на основе внутреннего неупругого сопротивления невозможно – если в диалоге «Параметры динамических воздействий» выбрать «Демпфирование материала», то рэлеевское демпфирование будет проигнорировано. **Поэтому при использовании данной модели диссипации параметры демпфирования должны быть заданы для каждого материала.**

Обозначим $\bar{\mathbf{u}} = \sum_{s=1}^{M_s} \mu_s \cdot \mathbf{k}_s \cdot f_s\left(t - t_0^s\right)$, $\dot{\bar{\mathbf{u}}} = \sum_{s=1}^{M_s} \mu_s \cdot \mathbf{k}_s \cdot \dot{f}_s\left(t - t_0^s\right)$, где $\mathbf{k}_s$ – векторы пространственной конфигурации, задающие форму вынужденных смещений, $f_s(t)$ – функция, задающая закон изменения нагрузки во времени, $s = 1, 2, \ldots, M_s$ – *ссылочные загружения* или просто *ссылки* – номера статических загружений при расчете на вынужденные смещения. Аналогично $\mathbf{p}(t) = \sum_{p=1}^{N_p} \mu_p \cdot \mathbf{k}_p \cdot f_p\left(t - t_0^p\right)$. Здесь $p = 1, 2, \ldots, N_p$ – *ссылочные загружения* или просто *ссылки* – номера статических загружений при расчете на силовые воздействия, $\mathbf{k}_p$ – векторы пространственной конфигурации нагрузки. Величины $\mu_s, t_0^s$, $\mu_p, t_0^p$ означают соответственно масштабные множители и время запаздывания.

Будем называть каждое слагаемое приведенных выше сумм соответственно *s*-й или *p-й составляющей динамического загружения*.

Обозначим $\mathbf{b}_s = -\mathbf{K}_{21} \cdot \mathbf{k}_s$, $\mathbf{c}_s = -\mathbf{C}_{21} \cdot \mathbf{k}_s$, $s = 1, 2, \ldots, M_s$. Дополняя полученное выше дифференциальное уравнение начальными условиями, получаем

$$\begin{cases} \mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = \sum_{s=1}^{M_s} \mathbf{b}_s \cdot \mu_s \cdot f_s\left(t - t_0^s\right) + \sum_{s=1}^{M_s} \mathbf{c}_s \cdot \mu_s \cdot \dot{f}_s\left(t - t_0^s\right) + \sum_{p=1}^{N_p} \mathbf{k}_p \cdot \mu_p \cdot f_p\left(t - t_0^p\right) \\ \mathbf{u}(0) = \mathbf{u}_0 \\ \dot{\mathbf{u}}(0) = \dot{\mathbf{u}}_0 \end{cases} \quad (6)$$

Здесь матрица **C** представляет как объединение рэлеевского демпфирования с локальными демпферами (если последние имеются), так и объединение демпфирования материала с локальными демпферами.

В случае рэлеевского демпфирования коэффициенты $\alpha$ и $\beta$ могут быть вычислены по формулам

$$\alpha = \frac{2\omega_i\omega_j\left(\xi_i\omega_j - \xi_j\omega_i\right)}{\omega_j^2 - \omega_i^2},\ \beta = \frac{2\left(\xi_j\omega_j - \xi_i\omega_i\right)}{\omega_j^2 - \omega_i^2}, \quad (7)$$

где $\omega_i$, $\omega_j$, – две собственные циклические частоты [рад/с] для форм колебаний $i$ и $j$, а $\xi_i$, $\xi_j$ – модальное демпфирование, заданное в процентах от критического демпфирования. Предполагается, что $\omega_j > \omega_i > 0$ и $\xi_j \geq \xi_i > 0$.

Если принять $i = 1$, $j = 2$, то

$$\alpha = \frac{2\omega_1\omega_2\left(\xi_1\omega_2 - \xi_2\omega_1\right)}{\omega_2^2 - \omega_1^2},\ \beta = \frac{2\left(\xi_2\omega_2 - \xi_1\omega_1\right)}{\omega_2^2 - \omega_1^2}\ . \quad (8)$$

В случае, когда $\omega_2 = \omega_1$ или первые две частоты очень близки ($\frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_1} < 0.0001$), принимается, что $\alpha = 2\xi_1\omega_1$, а $\beta = 0$.

Начальные условия определяются начальными перемещениями системы (вектор $\mathbf{u}_0$) и начальными скоростями (вектор $\dot{\mathbf{u}}_0$). В текущей реализации принято $\mathbf{u}_0 = \dot{\mathbf{u}}_0 = 0$.

***Метод решения.*** Для решения задачи используется α – HHT метод в форме «предиктор-корректор» [3], [5], [6]. Параметр смещения α вводит «ложную диссипацию», в результате чего данный метод подавляет колебания по высоким модам даже при отсутствии физического демпфирования. Если ввести параметр $\omega\Delta t$, где ω – пробная частота, а $\Delta t$ – выбранный шаг интегрирования, то частоты, хорошо аппроксимируемые данным шагом $\Delta t$, удовлетворяют неравенству $\omega\Delta t < 1$. Частоты, для которых $\omega\Delta t > 1$, при выбранном шаге $\Delta t$ аппроксимируются плохо, и если вклад мод колебаний соответствующих высоких частот велик, то численное интегрирование задачи (6) будет выполнено со значительной погрешностью. Часто это приводит к тому, что реакция расчетной модели по высоким (плохо аппроксимируемым) модам искажает численное решение. В таких случаях использование метода, вводящего ложную диссипацию, часто спасает положение. Строго говоря, при $\alpha \neq 0$ α – HHT метод математически некорректен, поскольку ложное затухание проявляется также и для частот $\omega\Delta t < 1$, хорошо аппроксимируемых при выбранном шаге $\Delta t$, хотя и в значительно меньшей степени, чем для плохо аппроксимируемых высоких частот. Однако для многих практических приложений малое подавление низких частот в пределах относительно небольшого количества циклов является приемлемым.

Параметр $\alpha \in [0, -1/3]$ обеспечивает устойчивое численное решение, причем наибольшее подавление высоких мод имеет место при $\alpha = -1/3$. При $\alpha = 0$ ложное затухание отсутствует, и α – HHT метод переходит в абсолютно устойчивый и строго корректный метод Ньюмарка.

Весь временной интервал $[t_{start}, t_{end}]$ разбивается на конечное число шагов $N_{step} = T_{dur}/\Delta t + 1, \quad T_{dur} = t_{end} - t_{start}$. В пределах одной постановки задачи шаг интегрирования $\Delta t$ сохраняется постоянным. Если возникает необходимость интегрировать уравнения движения с разным по величине шагом, необходимо разбить весь временной интервал на подинтервалы $[t_0, t_1], \quad [t_1, t_2], \quad \ldots, [t_{k-1}, t_k]$, каждый из которых интегрируется с постоянным в пределах интервала шагом $\Delta t_k$ (рис. 15.1-3). Первая постановка задачи – начало расчета – выполняется для первого подинтервала $[t_0, t_1]$, а остальные постановки задачи – продолжение расчета – соответственно для подинтервалов $[t_1, t_2], \quad \ldots, [t_{k-1}, t_k]$.

Запись результатов (перемещений, скоростей, ускорений) производится в некоторые из тех моментов времени, которые совпадают с точками интегрирования (рис. 15.1-4).

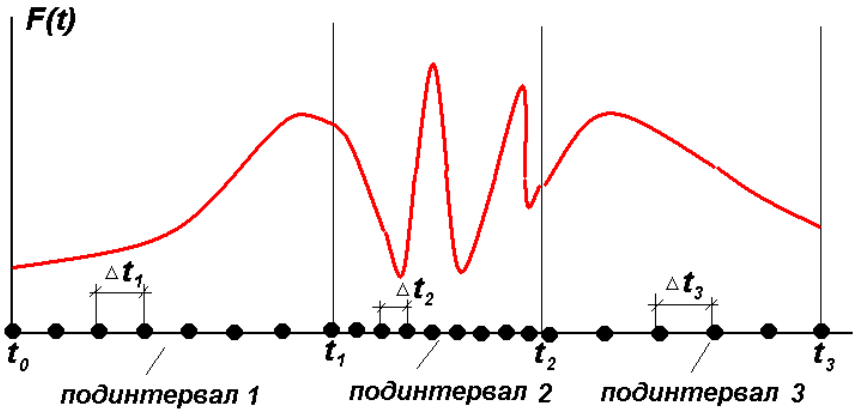



Рис. 15.1-3. *Разбивка на подинтервалы*

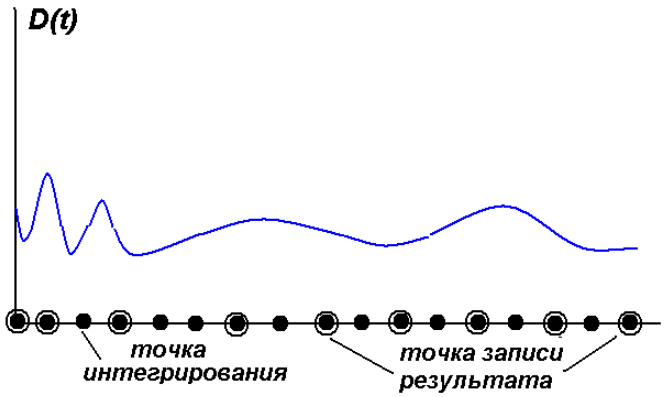



Рис. 15.1-4. *Точки интегрирования и точки записи результатов*

Обычно для достижения приемлемой точности решения шаг интегрирования значительно меньше шага записи результата. Возможна запись результата как с переменным шагом, так и с постоянным.

Реализация основана на технологии разреженных матриц, что позволяет значительно ускорить вычисления и сократить время анализа.

## 15.2. Задание исходной информации

### Назначение характеристик динамического загружения

Исходные данные для расчета задаются в многостраничном диалоговом окне **Параметры динамических воздействий** (рис. 15.2-2), которое вызывается кнопкой  из раздела **Загружения**

инструментальной панели препроцессора. В группе **Вид воздействия** следует активировать маркер **Прямое интегрирование**, после чего становится доступной одноименная страница (рис. 15.2-3).

Для выполнения расчета необходимо задать следующие данные:

- шаг интегрирования;
- продолжительность процесса;
- данные о модальном демпфировании, которые могут задаваться путем указания параметров демпфирования (в долях от критического) для первых двух собственных форм. В качестве альтернативного способа предусмотрено явное задание пользователем коэффициентов $\alpha$ и $\beta$ (при активном маркере **Задание самостоятельно**). Используя кнопку  , можно активировать диалоговое окно (рис. 15.2-1), которое позволяет ввести две собственные частоты и соответствующие параметры модального демпфирования. Нажатие кнопки **ОК** приведет к вычислению коэффициентов $\alpha$ и $\beta$ по формулам (7) и автоматической записи этих величин в соответствующие поля ввода; кроме того, учет демпфирования может быть произведен на основании данных о демпфировании материалов (в жесткостных характеристиках конечных элементов для этого следует задать параметр затухания);

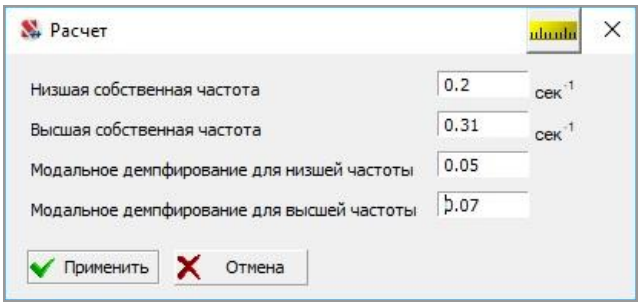



Рис. 15.2-1. *Определение параметров модального демпфирования*

- список моментов времени, в которых выполняется вывод результатов;
- параметр α – HHT метода.

В строках таблицы задается следующая информация:

- время запаздывания – интервал времени, позволяющий сдвигать заданную нагрузку во времени относительно момента начала процесса интегрирования;
- масштабный множитель, на который умножается интенсивность нагрузки в каждый момент времени;
- номер и название ссылочного статического загружения;
- полный путь и название текстового файла, задающего функцию времени $\varphi_p(t)$.

Если при задании моментов времени для выдачи результатов время процесса еще не исчерпано, то шаг выдачи следующих результатов определяется как разность между двумя последними заданными значениями. Например, пусть продолжительность процесса составляет 1 с, а в окне «Моменты времени для выдачи результатов» указано 0  0.02  0.03. Результаты расчета будут сохранены в моменты времени 0,  0.02 с  0.03 с  0.04 с  0.05 с  ...  1 с. Первые три момента времени явно заданы пользователем, а каждый из последующих моментов времени определяется как предыдущий плюс приращение, где приращение вычисляется как 0.03 – 0.02 = 0.01 с. Отсюда следует, что в окне «Моменты времени для выдачи результатов» как минимум должно быть указано два момента времени.

Для задания динамического загружения необходимо, прежде всего, задать ссылочные статические нагрузки точно так, как это делается для обыкновенных статических нагрузок. При этом возможно задавать не только узловые силы, но и сосредоточенные силы и распределенные нагрузки, приложенные к конечным элементам между узлами, а также вынужденные смещения опор, что позволяет производить расчет конструкций на сейсмические воздействия.

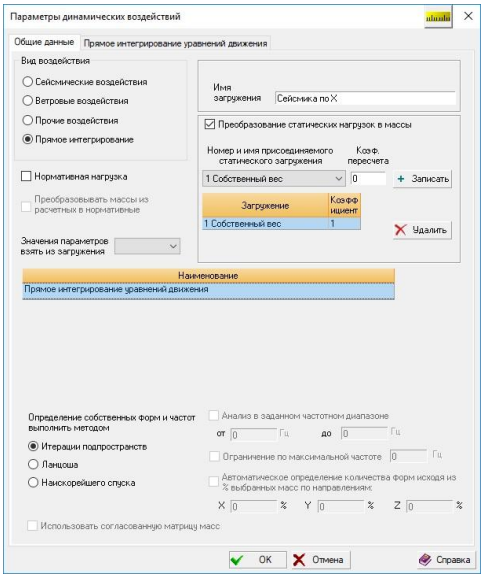



Рис. 15.2-2. *Страница* **Общие данные** *диалогового окна* **Параметры динамических воздействий**

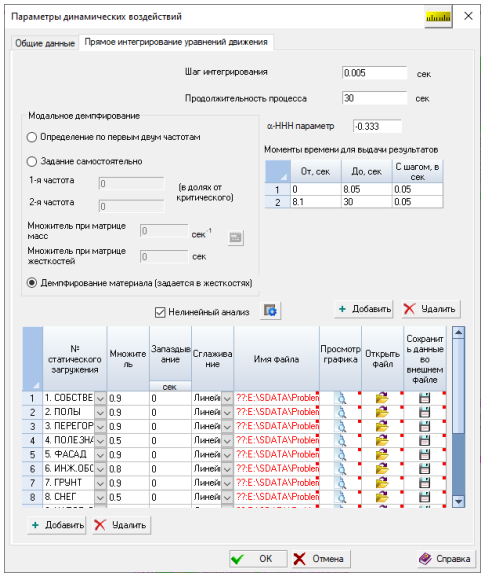



Рис. 15.2-3. *Страница* **Прямое интегрирование уравнений движения**

Для задания динамических нагрузок необходимо выполнить следующие действия:

- нажать кнопку **Добавить**, после чего в таблице с описанием нагрузок появится новая строка;
- в графе **№ статического загружения** выбрать из выпадающего списка статическое загружение, на основании которого будет генерироваться изменяемая во времени нагрузка;
- в графе **Множитель** задать масштабный множитель $\mu_1$;
- в графе **Запаздывание** указать время запаздывания $t_0^1$;
- нажатием кнопки  выбрать текстовый файл, задающий функцию $\varphi_1(t)$ (по умолчанию файл имеет расширение .thi);
- если необходим ввод второй составляющей, нажать кнопку **Добавить**, после чего в таблице появится новая строка, и повторить перечисленные выше действия.

Для контроля графика функции времени используется кнопка  , нажатие которой приводит к появлению диалогового окна **Функция времени** (рис. 15.2-4). Кнопки  в строках таблицы позволяют выбрать и заменить соответствующий текстовый файл с функцией времени.

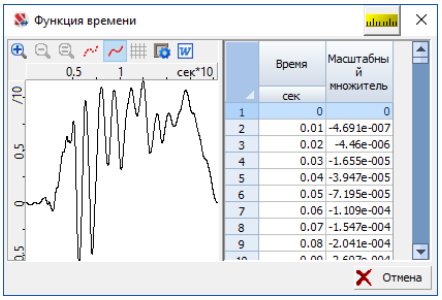



Рис. 15.2-4. *График функции времени*

Содержимое каждого текстового файла с функцией времени копируется и хранится "внутри" файла модели. Поэтому для переноса данных на другой компьютер достаточно скопировать только spr-файл. При этом может возникнуть ситуация, при которой указанный ранее путь уже не соответствует текущему положению файла. В этом случае строка таблицы принимает вид:




Два вопросительных знака и красный цвет имени файла указывает на отсутствие файла на диске, а кнопка позволяет сохранить функцию времени в файле на внешнем диске (для этого используется стандартный диалог **Сохранить** для выбора места хранения).

Для удаления какой-либо составляющей динамической нагрузки из списка необходимо курсором мыши выбрать соответствующую строку списка и нажать кнопку **Удалить.** Информация о динамическом загружении запишется в модель при выходе из диалогового окна нажатием кнопки **OK**.

В графе «**Сглаживание**» по умолчанию используется опция «линейная интерполяция». Дело в том, что значения функции времени $f_s\left(t-t_0^s\right)$ задаются в отдельные моменты времени. В процессе численного интегрирования необходимо выполнить интерполяцию – определить значение функции времени между узлами интерполяции – моментами времени, в которых задана функция $f_s\left(t-t_0^s\right)$. Для подавляющего большинства задач вполне достаточно применить линейную интерполяцию. Однако в случае вынужденного смещения опор (сейсмический анализ) может оказаться, что линейная интерполяция является слишком «жесткой» и возбуждает паразитные высокие частоты в силу того, что скорости $\dot{f}_s\left(t-t_0^s\right)$ в узлах интерполяции претерпевают разрывы, а ускорения $\ddot{f}_s\left(t-t_0^s\right)$ равны нулю на всем интервале интерполяции между узлами, а в узлах интерполяции представляются дельта-функциями Дирака [6].

В таком случае надо применить сглаживание, а возможно, и подавление высоких мод с помощью α – HHT метода. Для сглаживания выбираем опцию «Кубическая парабола» либо «Полином Эрмита». И в том, и в другом случае между узлами интерполяции функция времени $f_s\left(t-t_0^s\right)$ будет аппроксимироваться полиномом третьей степени, функция скоростей $\dot{f}_s\left(t-t_0^s\right)$ – полиномом второй степени, а ускорения $\ddot{f}_s\left(t-t_0^s\right)$ – линейной интерполяцией. В узлах интерполяции функции $f_s\left(t-t_0^s\right)$, $\dot{f}_s\left(t-t_0^s\right)$, $\ddot{f}_s\left(t-t_0^s\right)$ не имеют разрывов. Опция «Кубическая парабола» применима только для сейсмического анализа. **Входным воздействием является заданная акселерограмма. В процессе интегрирования уравнений движения SCAD автоматически определяет скорости и перемещения. Опция «Полином Эрмита» применима для любых видов динамического воздействия. В этом случае входным воздействием является функция вынужденных перемещений** (функция времени $f_s\left(t-t_0^s\right)$). В случае сейсмики заданную акселерограмму необходимо два раза проинтегрировать, используя редактор акселерограмм.

**Пример текстового файла**, задающего функцию времени $\varphi_p(t)$ с фиксированным шагом:

| Содержимое файла | Пояснения |
|---|---|
| 0 0.1 # | Тип файла – 0<br>Шаг по времени – 0.1<br>Управляющий символ – # |
| 1 | $\varphi_p(0)=1$ |
| 2 | $\varphi_p(0.1)=2$ |
| -1 | $\varphi_p(0.2)=-1$ |
| 0.5 | $\varphi_p(0.3)=0.5$ |
| 1 | $\varphi_p(0.4)=1$ |
| 0 | $\varphi_p(t)=0 \mid t=0.5,\ t=0.6,\ t=0.7,\ldots..,\ t=T_{dur}$ |

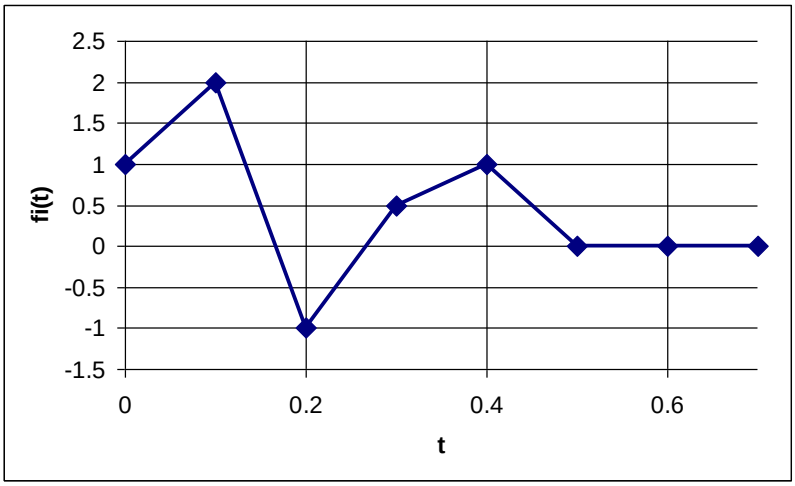



Рис. 15.2-5.

На рис. 15.2-5 изображена приведенная в таблице зависимость $\varphi_p(t)$ для моментов времени $t \le 0.7$. Если шаг интегрирования не совпадает с моментом времени, в котором задана функция времени, по умолчанию выполняется линейная интерполяция. Это следует принимать во внимание при задании нагрузок, быстро осциллирующих во времени.

Можно задавать также зависимости $\varphi_p(t)$ с переменным по времени шагом:

**Пример текстового файла**, задающего функцию времени $\varphi_p(t)$ с переменным шагом:

| Содержимое файла | Пояснения |
|---|---|
| 10 # | Тип файла – 10<br>Управляющий символ – # |
| 0 1 | $\varphi_p(0)=1$ |
| 0.1 2 | $\varphi_p(0.1)=2$ |
| 0.3 -2 | $\phi_p(0.3)=-1$ |
| 0.7 0.5 | $\phi_p(0.7)=0.5$ |
| 1 0 | $\phi_p(1)=0$ , $\phi_p(t)=0,\ t>=1$ |

При линейной интерполяции функции времени, относящейся к заданным перемещениям, в численном решении для ускорений в узлах, соседних с теми, в которых заданы вынужденные перемещения, могут возникнуть паразитные высокочастотные осцилляции. Для подавления этих осцилляций используется два подхода. Первый основан на α – HHT методе [3], подавляющий высокочастотные колебания при ω Δt ≥ 1, где ω – частота соответствующего тона, а Δt – шаг интегрирования по времени. При этом колебания с частотами ω Δt < 1 получаются достоверными. Степень подавления зависит от параметра α, α ∈ [-1/3,0]. Если α = 0, то подавление высоких частот отсутствует, и α – HHT метод переходит в метод Ньюмарка. Максимальное подавление осуществляется при α = -1/3.

Второй подход основан на интерполяции заданной функции времени кубической параболой либо полиномами Эрмита. Если пользователь задает акселерограмму (зависимость ускорений от времени), то в таблице с параметрами статических загружений в графе **Сглаживание** необходимо выбрать признак «Кубическая парабола». Сейсмограмма будет получена автоматически в процессе решения задачи при использовании интерполяции перемещений полиномом третьей степени.

Скорости при этом интерполируются с помощью полинома второй степени, а для ускорений используется линейная интерполяция. Этот способ применим только для сейсмического анализа.

Если сейсмограмма (зависимость перемещений от времени) получена с помощью редактора акселерограмм, то в графе **Сглаживание** необходимо выбрать признак «Полиномы Эрмита». В этом случае перемещения будут интерполированы полиномами третьей степени, скорости – полиномами второй степени, а ускорения – с помощью линейной интерполяции. Это способ применим для всех видов динамической нагрузки.

При выборе признака «Линейная интерполяция» заданная функция времени интерполируется полиномом первой степени. Если это функция зависимости перемещений от времени, то ее первая производная (скорости) интерполируется кусочно-постоянной функцией, а вторая производная (ускорения) между узлами интерполяции равна нулю, а в узлах интерполяции (в заданные моменты времени) представляется в виде дельта-функций Дирака. В случае, если задается смещение опор, такая интерполяция приводит к тому, что система движется рывками, которые и порождают упомянутые выше паразитные высокочастотные колебания.

Для каждой конкретной задачи следует выбрать, какой из приемов следует использовать, причем допускается одновременное применение как α – HHT метода, так и интерполяции высокого порядка.

Для того, чтобы за данным нелинейным статическим анализом был выполнен нелинейный динамический анализ, необходимо перевести, включить маркер **Нелинейный анализ**. При этом все нагрузки, прикладываемые на этапе статического анализа, передаются в динамический анализ, поэтому на этапе динамического анализа их прикладывать уже не надо. Данная реализация алгоритма соответствует решению задачи статики от действия статических нагрузок на первом этапе, а затем – задачи Коши на втором. Кроме того, этапу динамического анализа как начальное состояние передается напряженно-деформируемое состояние всех нелинейных конечных элементов, полученных в конце этапа статического анализа. Поскольку решается нелинейная задача, то принцип суперпозиции неприменим, и решение динамической задачи «отсчитывается» от решения статической задачи.

Задание параметров нелинейного анализа осуществляется в диалоге **Параметры** при нажатии на кнопку  (рис. 15.2-6). Если маркер **Явный метод интегрирования** отключен, выбирается неявный метод предиктор-корректор, исходные данные для которого представлены на этом рисунке и описаны ниже.

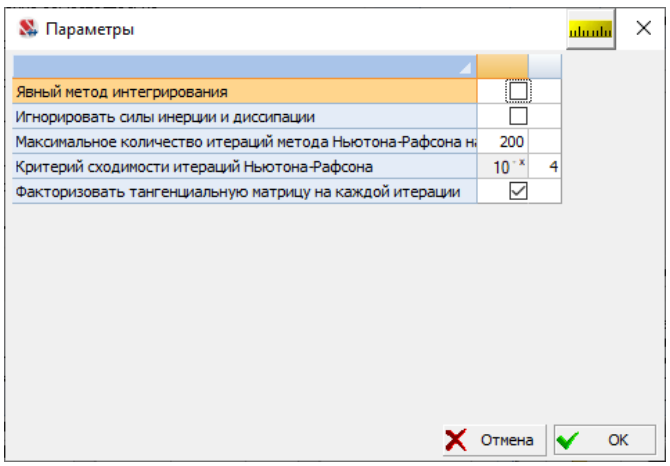



Рис. 15.2-6. Параметры нелинейного динамического анализа. Неявный метод

При нажатии на кнопку **Игнорировать силы инерции и диссипации** выполняется статический анализ, использующий алгоритм интегрирования уравнений движения. В ряде случаев этот алгоритм оказывается удобнее статического, особенно при многопараметрическом нагружении. Далее необходимо задать максимальное количество итераций метода Ньютона-Рафсона на данном шаге по времени и допускаемую величину ошибки при подавлении невязки в процессе итераций корректора. Если опция **Факторизовать тангенциальную матрицу жесткости на каждой**

**итерации** включена, то реализуется метод Ньютона-Рафсона. В противном случае сборка и разложение тангенциальной матрицы жесткости производится только на первой итерации (модифицированный метод Ньютона-Рафсона). Обычно при учете физической нелинейности требуется факторизация тангенциальной матрицы жесткости на каждой итерации. Подробное описание реализованного алгоритма решения нелинейной задачи Коши приведено в [5].

Если маркер **Явный метод интегрирования** включен, выбирается явный метод интегрирования, представляющий собой объединение подходов [3, 7]. Диалог **Параметры** принимает вид

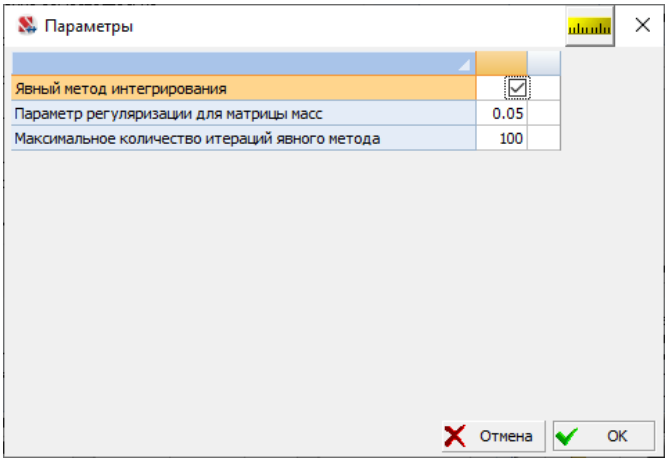



Рис. 15.2-7. Параметры нелинейного динамического анализа. Явный метод.

Явный метод интегрирования для некоторых задач может оказаться более эффективным, чем неявный, не требует сборки и разложения матрицы тангенциальной жесткости, и в случае значительного разрушения элементов конструкций может оказаться значительно более стабильным, чем неявный. С другой стороны, явный метод требует обычно задания значительно меньшего шага интегрирования, чем неявный, а также матрица масс должна быть только диагональной и при этом не должна быть особенной. Это означает, что на степенях свободы, соответствующих как поступательным перемещениям, так и углам поворота, не должно быть нулевых инерционных параметров.

Обычно в расчетных моделях МКЭ с диагональной матрицей масс на вращательных степенях свободы находятся нулевые элементы. Поэтому при использовании явного метода производится регуляризация матрицы масс, и параметр регуляризации $\gamma$, обычно принимаемый в пределах [0.0001, 0.1], задает значения фиктивных величин $\gamma \cdot \max\{M\}$, добавляемых к нулевым элементам диагональной матрицы масс. Здесь $\max\{M\}$ – наибольший элемент исходной матрицы масс. Если текущий элемент матрицы масс исходной расчетной модели отличен от нуля, то он остается без изменений. Чем меньше $\gamma$, тем меньше искажается исходная матрица масс, но тем меньший шаг интегрирования $\Delta t$ требуется для обеспечения устойчивости численного решения.

Увеличение количества итераций явного метода на каждом временном шаге $\Delta t$ повышает точность решения, однако увеличивает время счета, поскольку на каждой итерации вычисляются внутренние силы системы.

Рекомендуется начать анализ с величин параметров, установленных по умолчанию.

**Использование явного метода интегрирования уравнений движения возможно только в режиме нелинейного анализа и только при выборе решателя PARFES, обеспечивающего высокопроизводительный режим интегрирования уравнений движения.**

Если маркер **Нелинейный анализ** отключен, за данным нелинейным статическим анализом выполняется линейный анализ интегрирования уравнений движения. В этом случае нагрузки и напряженно-деформированное состояние конечных элементов в динамический анализ не передается, а результаты динамического анализа отсчитываются от недеформированного состояния. Влияние нелинейного статического анализа на последующий линейный динамический

обусловлено только тем фактом, что динамический анализ использует матрицу тангенциальной жесткости, полученную в конце нелинейного статического анализа – рассматриваются малые линейные колебания относительно положения статического равновесия, определенного на этапе нелинейного статического анализа. При этом все нелинейные конечные элементы подменяются их линейными аналогами.

## Задание узловых воздействий



Нагрузки, действующие на расчетную схему, задаются в виде узловых сил и моментов. Для их задания следует выполнить следующие действия:

- в инструментальной панели **Загружения** установить (выбрать из списка) созданное ранее динамическое загружение с типом воздействия **Прямое интегрирование …**;
- активировать операцию **Параметры динамических нагрузок**, в результате чего появляется диалоговое окно **Узловая нагрузка во времени** (рис. 15.2-8);
- задать в поле ввода **График изменения нагрузки во времени** или выбрать из списка (кнопка **Файл**) имя файла с расширением .txt, описывающего график изменения нагрузки во времени для определенной группы узлов (следует отметить, что разные нагрузки в узле могут ссылаться на разные графики);
- назначить значения масштабных множителей к узловым силам и моментам указанной выше группы узлов, а также, если это необходимо, время запаздывания воздействия по сравнению с указанным в графике;
- выйти из диалогового окна нажатием кнопки **ОК**;
- выбрать на схеме узлы, входящие в описываемую группу, и нажать кнопку **ОК** в инструментальной панели;
- повторить описанные действия для других групп узлов;
- после завершения описанных действий сохранить загружение.

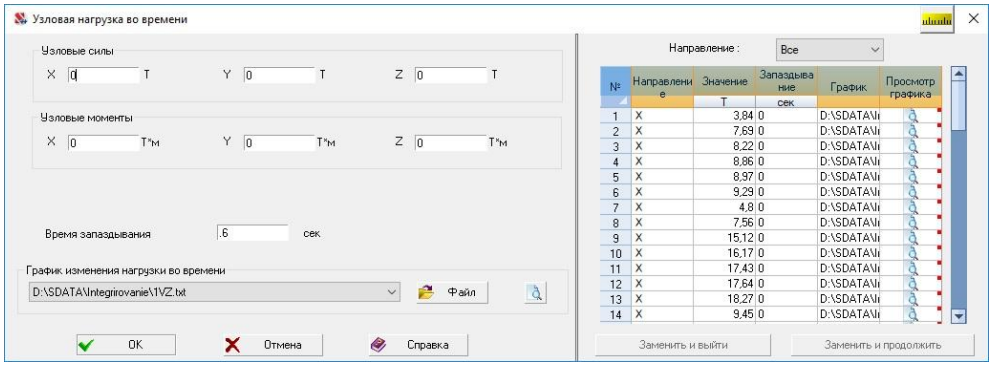



Рис. 15.2-8. *Диалоговое окно* **Узловая нагрузка во времени**

## 15.3. Расчет

В процессе расчета формируется протокол (рис. 15.3-1), в котором, в частности, содержится следующая информация, касающаяся прямого интегрирования уравнений движения:

*Прямое интегрирование уравнений движения - метод Ньюмарка;*

*Количество шагов интегрирования: ... ;*

*Количество точек записи результатов: ...;*

*Шаг интегрирования dt: ...;*

*Параметр модального демпфирования: ksi1 = ...;*

*Параметр модального демпфирования: ksi2 = ...;*

*Параметр демпфирования alpha - множитель при матрице M: ...;*

*Параметр демпфирования beta - множитель при матрице K: ....*

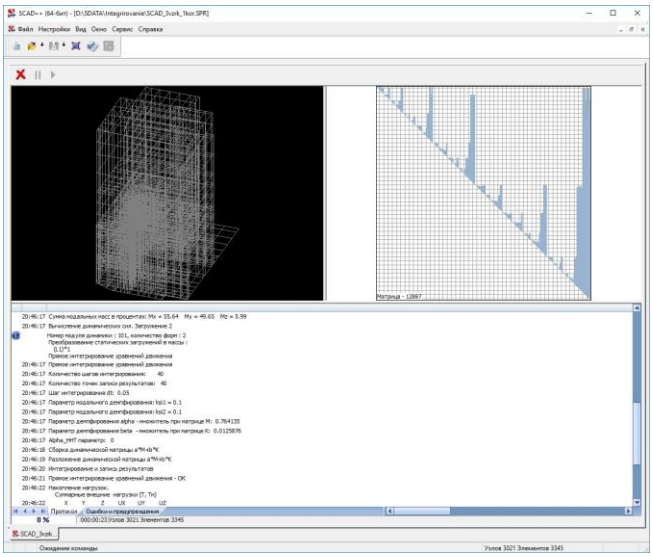


Рис. 15.3-1. *Протокол расчета при прямом интегрировании*

## 15.4. Результаты расчета

### Результаты расчета в фиксированный момент времени

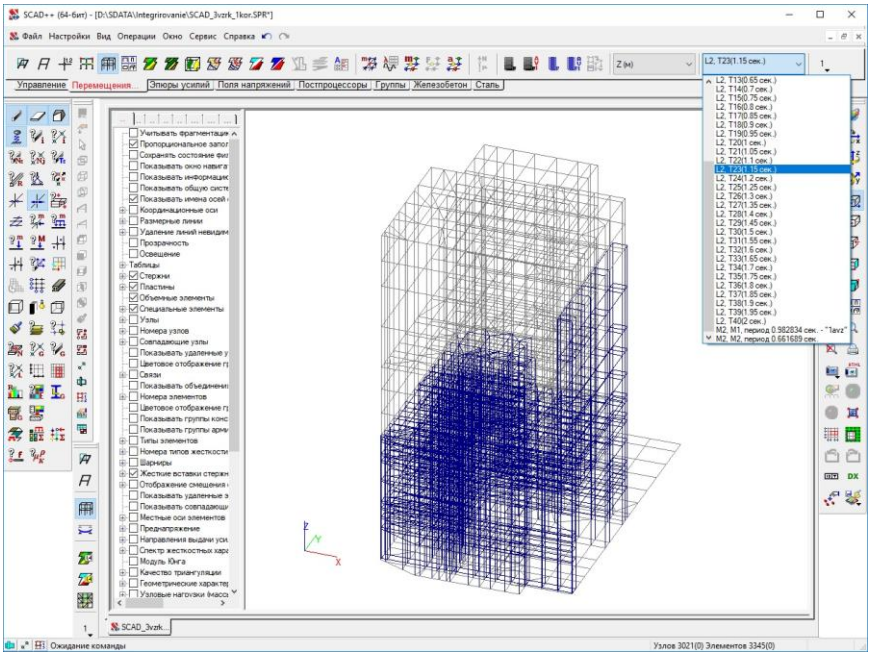


Рис. 15.4-1.

Результаты расчета доступны в графическом и табличном постпроцессорах (рис. 15.4-1). Выбор номера статического загружения и момента времени для динамического загружения выполняется в выпадающем списке загружений в соответствующей инструментальной панели (рис. 15.4-1). Для выбранного момента времени могут отображаться результаты расчета, например, в виде формы перемещений (рис. 15.4-2), эпюры усилий (рис. 15.4-3) или изополей напряжений (рис. 15.4-4).

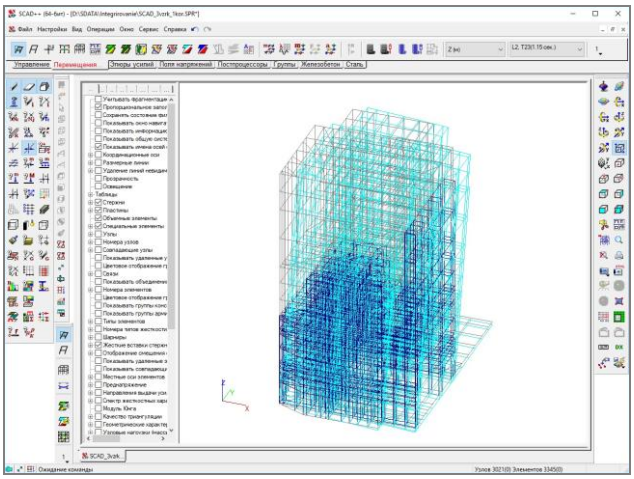


Рис. 15.4-2.

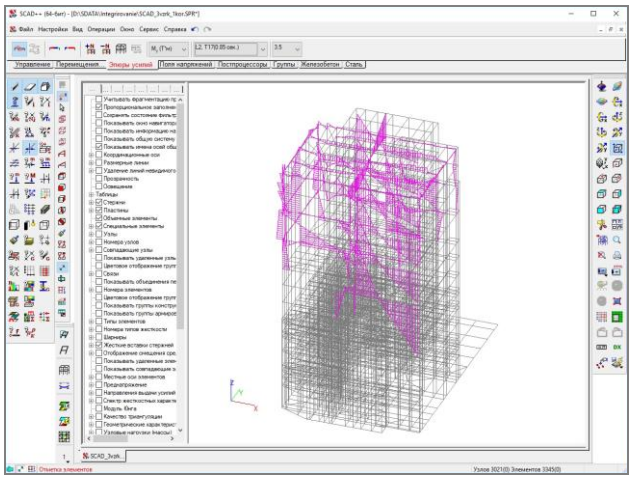


Рис. 15.4-3.

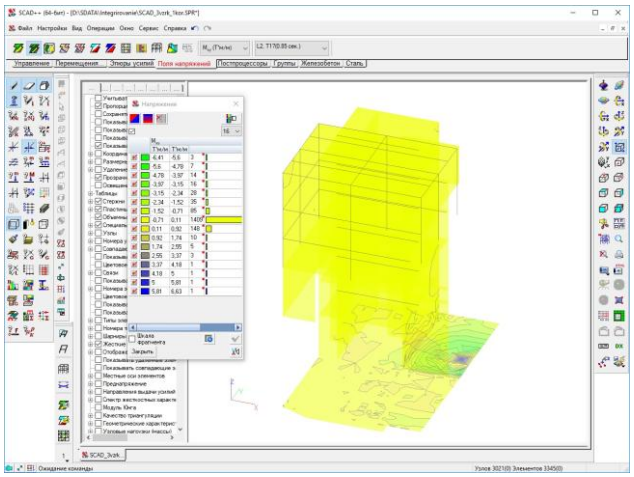


Рис. 15.4-4.

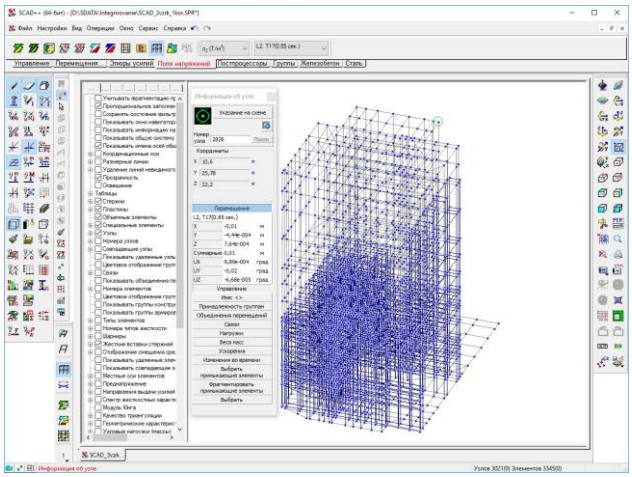


Рис. 15.4-5.

## Графики перемещений, скоростей и ускорений узлов

При анализе деформированного состояния конструкции в выбранный момент времени можно получить графики перемещений, скоростей и ускорений в каждом узле за весь период анализа. Для этого используется операция **Изменения во времени**, которая вызывается нажатием одноименной кнопки в окне фильтров **Информация об узле** (рис. 15.4-5).

После активации операции появляется диалоговое окно **Графики перемещений узла во времени** (рис. 15.4-6), в котором из списка выбирается вид анализируемой информации (перемещения, скорости, ускорения), а также набор графиков (направления X, Y, Z и суммарное), их стиль и цвет, цвет фона.

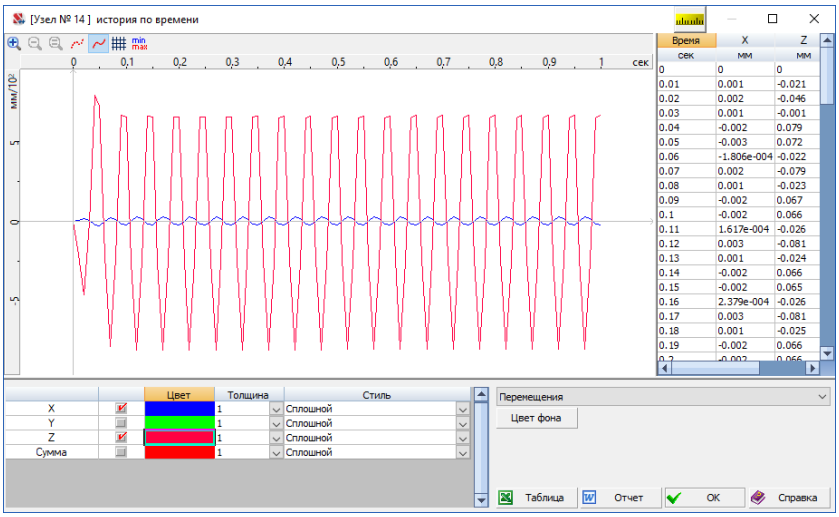



Рис. 15.4-6.

При необходимости графики и соответствующие таблицы можно сохранить в виде отчетного документа MS Word (кнопка **Отчет)** или экспортировать в xls-файл для дальнейшей обработки в MS Excel (кнопка **Таблица**).

Кнопка  инструментальной панели позволяет активировать диалог с информацией о минимальных и максимальных значениях на графиках. Эта информация также будет помещена в отчетный документ.

Кнопка  в инструментальной панели закладки **Перемещения** позволяет получить графики изменения перемещений, скоростей, ускорений по выбранному направлению (или суммарное) для нескольких ***предварительно селектированных*** узлов. Активация данной операции приводит к появлению диалога аналогичного описанному выше. Пользователь может выбрать опцию вывода абсолютных значений или значений относительно некоторого узла.

## Графики усилий (напряжений) в элементах

Графики усилий/напряжений в элементе за весь период анализа строятся аналогично графикам перемещений. Соответствующая операция **Изменения во времени** вызывается из окна **Информация об элементе** (рис. 15.4-7). После активации операции появится диалоговое окно **[Элемент № …] история во времени** (рис. 15.4-8).

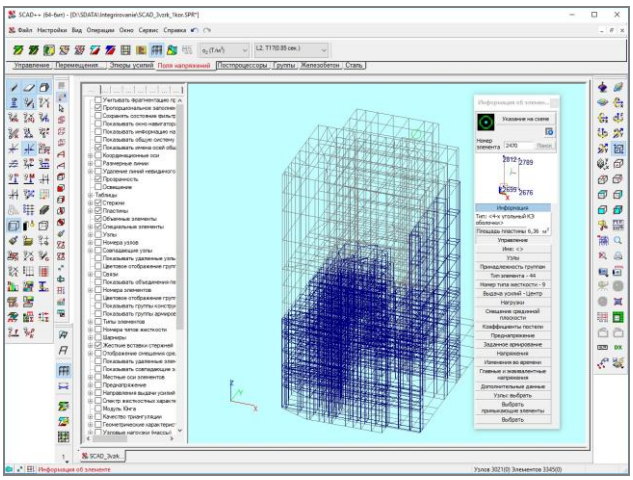


Рис. 15.4-7.

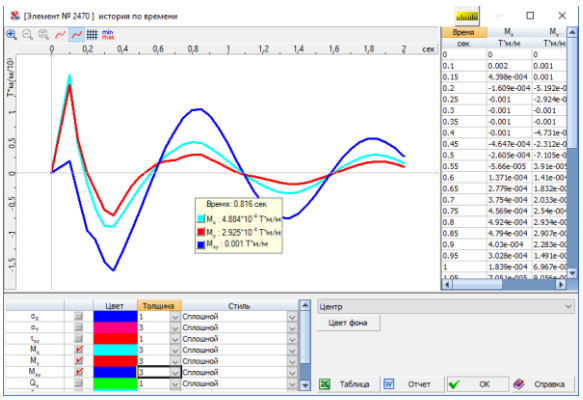



Рис. 15.4-8.

Для стержневых элементов графики изменения во времени силовых факторов могут быть построены для указанного сечения, а для пластинчатых и объемных элементов — для заданного

узла или центра элемента. При этом необходимо следить за тем, чтобы размерности всех одновременно отображаемых усилий/напряжений были идентичны.

Кнопка  инструментальной панели позволяет активировать диалог с информацией о минимальных и максимальных значениях на графиках. Эта информация также будет помещена в отчетный документ.

## 15.5. Возможное использование

Возможны случаи, когда интерес представляет проверка системы на возможность обрушения как последствие известного аварийного воздействия, например, взрывного.

Для выполнения такого расчета можно воспользоваться тем обстоятельством, что в режиме **Прямое интегрирование уравнений движения** при создании динамического загружения можно назначить для некоторой группы узлов различные **графики изменения нагрузки во времени**. Тогда в режиме прямого интегрирования физически нелинейной системы решается задача, в которой для анализа ситуации сначала медленно прикладываются все статические нагрузки, дается время для затухания колебаний, вызванных их приложением, а затем прикладываются динамические нагрузки, после приложения которых программа производит анализ возникающих разрушений.

## 15.6. Литература к главе Прямое Интегрирование Уравнений Движения


1. Р. Клаф, Дж. Пензиен, *Динамика сооружений*, Москва, Стройиздат, 1979.
2. R. W. Clough, J. Penzien, *Dynamics of structures*, Third Edition. Computers & Structures Inc., Berkeley, CA, USA, 1995.
3. Miranda I., Ferencz R. M., Hughes T. J. R. *An improved implicit-explicit time integration method for structural dynamics*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 18, 1989, pp. 643 – 653.
4. Фиалко С. Ю. *Интегрирование уравнений движения в системе SCAD*. Материалы семинара SCAD Soft, Киев, 2012 г. URL: http://scadsoft.com/download/2012/Fialko_Integration_of_movement_equations.pdf
5. Фиалко С. Ю. *Применение метода конечных элементов к анализу прочности и несущей способности тонкостенных железобетонных конструкций с учетом физической нелинейности*, Издательство СКАД СОФТ, Издательский дом АСВ, Москва, 2018.
6. Фиалко С. Ю. О *постановке задачи интегрирования уравнений движения при расчете на сейсмику, реализованной в программном комплексе SCAD*, Материалы семинара SCAD Soft, Москва, 2018. URL: https://scadsoft.com/download/2018_04_Msk/23_(2018)_O_postanovke_zadachi_integrirovaniya_uravney_dvizheniya_pri_raschete...(Fialko_S.Y)_Kiev.pdf
7. Hughes T.J.R., Belytschko T. *Course notes for nonlinear Finite element analysis*, Munich, Germany, 4 – 8 September, 1995.

# 16. Вариация моделей

## 16.1. Учет неопределенности параметров расчетной модели

Параметры расчетной модели, которыми оперирует исследователь, практически всегда являются величинами неточными. Часто эти параметры являются, по существу, случайными величинами и, принимая то или иное значение, мы оперируем с некоторой реализацией такой случайности.

К числу наиболее изменчивых элементов расчетной модели принадлежат нагрузки. Даже учет собственного веса конструкций по действующим нормам может меняться примерно на ±10…15%, а это одна из самых стабильных нагрузок. Другие нагрузки меняются в гораздо более широком диапазоне как по интенсивности и направлению действия, так и по расположению на конструкции. Именно эта особенность загружения инициировала разработку разнообразных методов поиска так называемого «невыгодного загружения», т. е. отыскания такого сочетания различных компонентов внешних воздействий, при котором достигается экстремум некоторого внутреннего усилия, напряжения в сечении, перемещения в узле и т. п. Начиная от классических работ по обоснованию методов отыскания наиболее невыгодного расположения группы подвижных грузов на линии влияния, и кончая работами, основанными на применении современных методов решения задач многокритериальной оптимизации, эта проблема привлекала к себе пристальное внимание специалистов. Тем большее удивление вызывает то обстоятельство, что проблема учета изменчивости других параметров расчетной модели оказалась не столь популярной, хотя ее практическое значение чрезвычайно велико.

## 16.2. Различия между моделями

В комплекс **SCAD** введен специальный режим, который предусматривает возможность обработки результатов расчета нескольких близких *вариантов* расчетной схемы. Близость вариантов трактуется в том смысле, что они являются топологически подобными, содержат одинаковое количество узлов и элементов и допускают только определенные различия между сопоставляемыми расчетными моделями:

- возможность использования отличающихся друг от друга типов элементов, включая применение элементов «скрытого» типа, которые имитируют отсутствие элементов, не меняя их общего количества;
- возможность изменения жесткостных параметров конечных элементов, включая использование нулевых значений некоторых жесткостей и различных коэффициентов постели;
- различия в системе наложенных связей и/или в условиях примыкания элементов к узлам (врезка шарниров, установка бесконечно жестких вставок).

## 16.3. Формирование пакета моделей

Для того чтобы выполнить расчет по нескольким моделям, необходимо создать новый проект со специальным признаком **Вариация моделей**, который устанавливается путем активации одноименного маркера в диалоговом окне **Новый проект** (рис. 16.3-1). После выхода из этого диалогового окна появляется окно **Сохранить как ...**, в котором задается имя файла проекта (с расширением **.vpr**). Это имя не должно повторять ни одно из имен файлов задач, входящих в пакет моделей. Например, если файлы задач имели имена P1, P2, P3, то в качестве имени пакета моделей можно назначить P123 или любое другое имя, отличное от приведенных выше для того, чтобы отличались имена рабочих файлов и файлов печати (см. Приложения).

Следует помнить, что файл вариационного проекта и файлы задач, входящих в этот проект, должны находиться в одной директории.

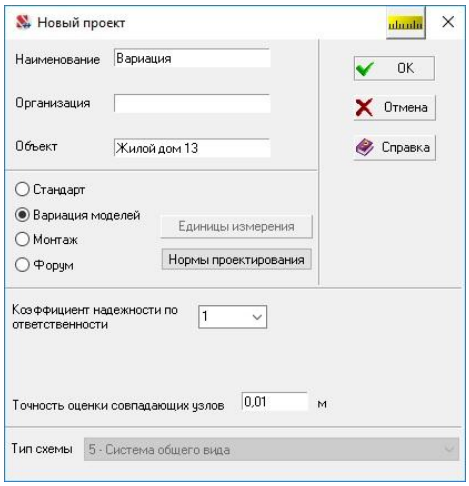



Рис. 16.3-1. *Диалоговое окно* **Новый проект**

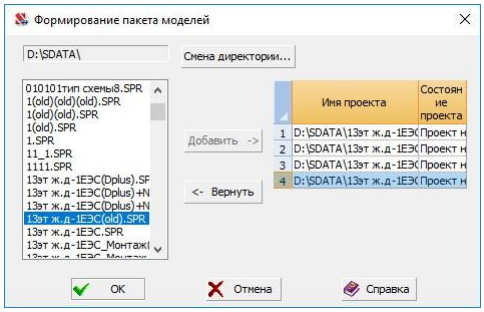



Рис. 16.3-2. *Диалоговое окно* **Формирование пакета моделей**

В качестве исходных данных рассматриваемого режима фигурирует только список файлов задач, входящих в пакет. Список задается в диалоговом окне **Формирование пакета моделей** (рис. 16.3-2), которое вызывается из одноименного раздела **Дерева проекта** (рис. 16.3-3). Для включения задачи в пакет следует выбрать имя файла проекта в левом списке и нажатием кнопки **Добавить** перенести его в правый список. Состояние проекта (произведен ли расчет) отражается в одноименном столбце правого списка.

Если модели отличаются количеством «скрытых» элементов, то рекомендуется такой порядок включения задач в проект, при котором на первом месте будет стоять «максимальная модель», т. е. такая модель, в которой присутствуют в явном виде все элементы. Слияние пакета моделей в одну расчетную схему происходит после инициализации расчета в дереве проекта.

При создании пакета моделей программа выполняет проверки регламентируемой близости серии задач. При положительном результате этой проверки результаты расчетов всех вариантов расчетной модели сливаются в один массив (как будто одна схема рассчитана на все варианты загружения, которые фигурировали во всех ранее выполненных расчетах).

Расчет может быть выполнен только в том случае, когда все входящие в вариацию моделей задачи уже посчитаны. Следует так же убедиться в том, что ни одна из моделей пакета не открыта в текущей или другой копии программы **SCAD**.

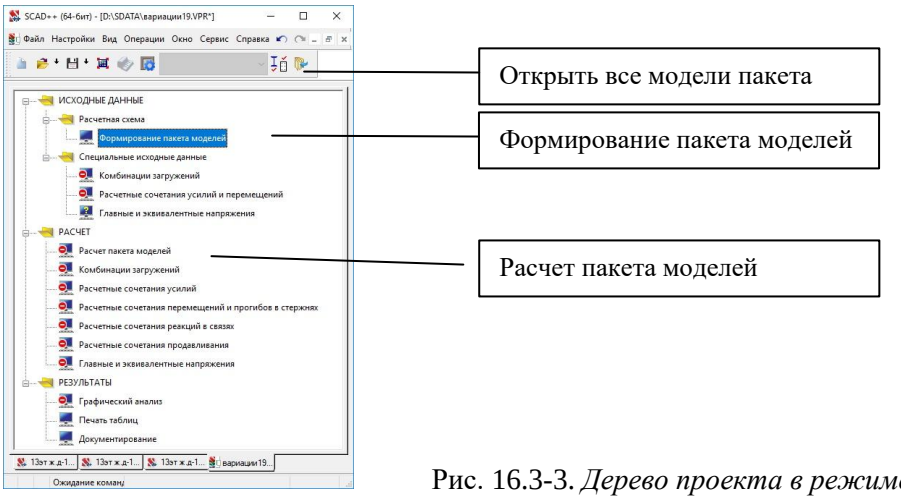



Рис. 16.3-3. *Дерево проекта в режиме* **Вариации моделей**

Для полученной таким способом суперзадачи можно выполнять режимы формирования расчетных сочетаний усилий (**РСУ**), создавать комбинации загружений, подбирать арматуру в элементах железобетонных конструкций, проверять или подбирать сечения стальных конструкций.

Если во всех задачах, входящих в пакет моделей, вычислены реакции в связях, то при выполнении расчета будут автоматически вычислены реакции в связях вариации.

Если необходимо внести изменения во все задачи пакета моделей или активировать их расчет, то можно воспользоваться операцией **Открыть все модели пакета** —  (рис. 16.3-3), в результате выполнения которой все расчетные схемы будут загружены в препроцессор.

## 16.4. Расчетные сочетания усилий

Исходные данные для формирования РСУ (см. главу 18) задаются по тем же правилам, что и для обычного проекта. Список загружений будет включать набор загружений каждой локальной задачи в порядке их следования в вариационном пакете. По умолчанию, взаимоисключения между наборами загружений, относящимися к разным задачам пакета, устанавливаются автоматически. Но программа предоставляет возможность с помощью соответствующего маркера отказаться от автоматического взаимоисключения. Пользоваться этой возможностью следует очень осторожно, поскольку (в общем случае) неприменим принцип суперпозиции, на котором основано вычисление РСУ.

Если локальные задачи, входящие в пакет, содержат исходные данные для формирования РСУ, то установленные для каждой задачи отношения между загружениями (объединение, взаимоисключение, сопутствие) сохраняются в исходных данных РСУ вариационного пакета. При этом пользователь может внести изменения в эти данные.

## 16.5. Результаты расчета и их анализ

В режиме графического анализа результатов расчета (деформации, эпюры усилий и т. п.) в строках выпадающего списка **Выбор загружения** (рис. 16.5-1) дополнительно к описанным в главе 8 параметрам указываются: номер задачи в пакете и номер загружения в этой задаче. Для динамических загружений дополнительная информация приводится только для первой формы колебаний.

Экспертиза несущей способности элементов железобетонных и стальных конструкций, а также подбор арматуры и сечений прокатных профилей выполняется по расчетным сочетаниям усилий, полученным для всего пакета моделей.

Поскольку в моделях могут различаться размеры сечений, включая толщины пластинчатых элементов, то необходимо назначить модель, на основе которой будет выполняться конструирование. Модель выбирается из списка **Назначение схемы для конструирования** в инструментальной панели **Общие данные** (рис. 16.5-2), которая открывается одновременно с деревом проекта при загрузке пакета задач (файл с расширением **.VPR**). Если модель не назначена, то по умолчанию необходимая информация будет выбираться из первой схемы в списке пакета задач.

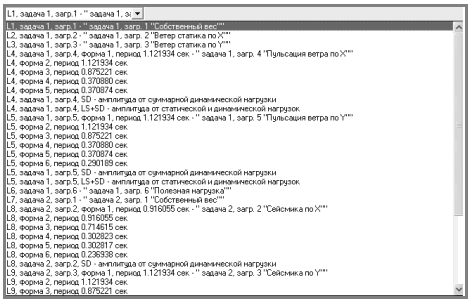



Рис. 16.5-1. *Окно* **Выбор загружения** для вариации моделей

Для того чтобы войти в постпроцессоры **Сталь** или **Железобетон**, следует, например, на закладках *Перемещения* или *Усилия* выбрать загружение, которое соответствует модели, выбранной для конструирования.

Данные, необходимые для выполнения операций, связанных с конструированием, могут быть заданы в различных моделях. Для их переноса в файл вариационного проекта следует указать вид данных и из какого проекта, входящего в пакет задач, они берутся. Для этого используется операция **Импорт данных из проекта в файл вариаций** —  , которая вызывается из инструментальной панели **Общие данные** (рис. 16.5-2). После активации этой операции

открывается одноименное диалоговое окно (рис. 16.5-3), в котором предусмотрен перенос следующих данных:

- общие настройки;
- информация о группах элементов железобетонных конструкций;
- информация о группах элементов стальных конструкций;
- информация о группах унификации элементов стальных конструкций;
- информация для экспертизы заданных сечений элементов стальных конструкций;
- информация для экспертизы заданного армирования;
- информация о группах элементов деревянных конструкций;
- информация о группах огнестойкости;
- информация о группах элементов;
- информация о группах узлов;
- информация об узлах продавливания.

Основное правило переноса — каждый вид данных целиком берется из одной модели. Это означает, что конструктивные группы и группы унификации могут быть описаны как в одной, так и в нескольких схемах, но в вариационный пакет конкретный набор групп, например, элементов стальных конструкций, должен быть взят из одной схемы.

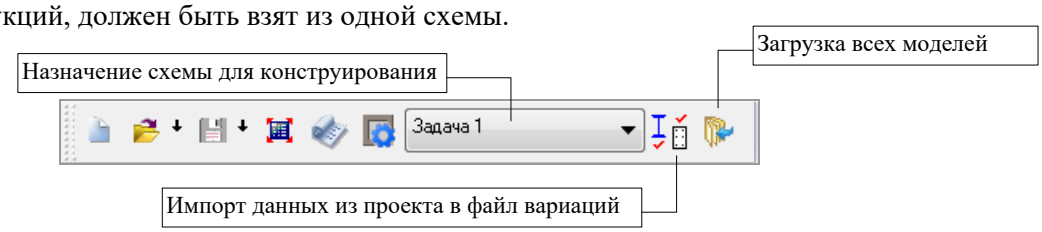



Рис. 16.5-2. *Инструментальная панель* **Общие данные** *в режиме* **Вариации моделей**

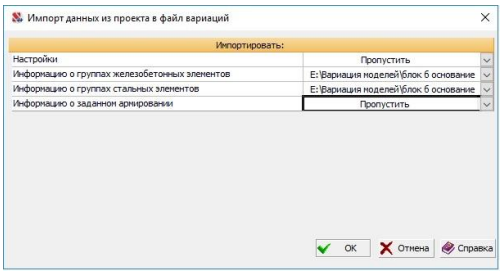



Рис. 16.5-3. *Диалоговое окно* **Импорт данных из проекта в файл вариаций**

## 16.6. Использование вариации моделей

### Параметры жесткости

В достаточно большой мере неопределенными могут быть параметры жесткости элементов расчетной схемы. Это может быть связано с естественным разбросом значений, например, такого параметра, как модуль упругости бетона, номинальное значение которого традиционно выбирается по рекомендациям норм проектирования, а изменчивость реализаций, включая возможные изменения в пределах объекта и изменения во времени, столь же традиционно не учитываются. Несмотря на достаточно узкий коридор изменчивости модуля упругости, во многих случаях имеются серьёзные основания считаться с изменчивостью этого параметра.

К таким же случаям принадлежит учет повреждений, которые накапливаются в конструкции в процессе эксплуатации. Эти повреждения должны учитываться при расчетах, связанных с оценкой технического состояния существующих конструкций, и приниматься по обнаруженным при обследованиях значениям. Но далеко не все элементы существующей конструкции доступны для обследования. Поэтому о жесткостных параметрах таких элементов судят по состоянию других, доступных частей сооружения. Диапазон неопределенности при этом может быть достаточно велик.

К рассматриваемым случаям относятся многие подземные конструкции, элементы, скрытые внутри забетонок, и другие, для которых при строительстве специально предусматривается составление так называемых «актов на скрытые работы».

### Податливость оснований

Большой изменчивостью и, следовательно, неопределенностью значений характеризуются параметры упругости естественных оснований. Здесь играют свою роль и неполнота имеющихся инженерно-геологических данных, и приближенность расчетной модели основания (винклеровская, пастернаковская, полупространство и т. п.). По-видимому, в лучших случаях эти параметры могут иметь разброс значений порядка ±30%, а в некоторых ситуациях возможны существенно большие отклонения.

Так, в нормах проектирования атомных станций США рекомендуется вводить искусственную вариацию модуля сдвига грунта G, полагая, что он может меняться от $G^*(1 + G_v)$ до $G^*/(1 + G_v)$, где $G^*$ есть его наиболее вероятная оценка, а $G_v$ — его коэффициент вариации, принимаемый не менее 0,5.

Расчет по нескольким моделям позволяет также корректно учесть различную работу грунта при загружении конструкции постоянными (длительными) и кратковременными, в том числе и динамическими, нагрузками. В этом случае для нагрузок длительного действия следует использовать модель, где в качестве исходных данных для расчета коэффициентов постели используются значения модуля деформации грунта, а для кратковременных и динамических воздействий — модель, где для этих же целей используется модуль упругости.

### Узловые соединения

При выборе расчетной схемы обычно принимаются идеализированные условия соединения элементов в узлах (абсолютно жесткое, шарнирное), хотя эти соединения имеют определенные упругие свойства. Однако оценить их податливость удается достаточно редко, поскольку опыт свидетельствует, что эта оценка может быть практически проведена лишь в эксперименте. Надежных расчетных методов для получения таких оценок в настоящее время почти не имеется. Поэтому инженеры вынуждены задаваться значениями податливостей узловых соединений в достаточной мере произвольно, ориентируясь на результаты экспериментальных исследований «похожих» конструкций.

Существует некоторая возможность реально создавать те или иные конструктивные решения соединений шарнирными или жесткими, и она нередко используется при проектировании, когда в руках конструктора имеются средства для фактической реализации решения, принятого в расчетной схеме. Но эта возможность отсутствует в условиях проверки уже существующей конструкции, когда конструктивное решение нельзя приспособить к расчетной модели. Здесь действительная схема часто остается неясной, и проверка конструкции должна быть реализована в условиях указанной неопределенности.

# 17. Комбинации загружений

Режим **Комбинации загружений** позволяет получить показатели напряженно-деформированного состояния системы, на которую одновременно действуют несколько загружений. При этом любое из загружений может быть включено в комбинацию с некоторым множителем. Это позволяет получить, например, ответ на такой вопрос: чему равны перемещения от действия загружения «собственный вес», взятого с множителем 0,9 и загружения «снег», взятого с множителем 0,7. Если упомянутые загружения были заданы своими расчетными значениями, то нетрудно увидеть, что мы получим перемещения от нормативных нагрузок.

Если в комбинацию входит динамическое загружение, то при вычислении усилий и перемещений данной комбинации используется значение суммарной динамической нагрузки, полученной путем свертки перемещений или усилий по всем учитываемым формам собственных колебаний. Например, для сейсмического загружения, эта нелинейная процедура состоит в том, что суммируются квадраты результатов по каждой форме, а затем из этой суммы извлекается квадратный корень. Динамическое загружение является знакопеременным, поэтому следует выбрать знак свертки. **SCAD** выбирает знак в соответствии со знаком формы, в которой получено максимальное по абсолютной величине значение усилия/реакции/... . Для ветрового загружения включается соответствующее статическое ветровое загружение (и знак свертки принимается в соответствии со знаком статического ветрового загружения). Включение в комбинацию отдельных форм колебаний не предусматривается, поскольку их свертка выполняется нелинейно.

В отличие от режима **Расчетные сочетания усилий**, где заранее не было известно, какая комбинация загружений окажется невыгодной (расчетной) для напряжения в определенном сечении, и поиск такой комбинации выполнялся автоматически по правилам СНиП, в режиме **Комбинации загружений** предполагается явное указание рассматриваемой комбинации.

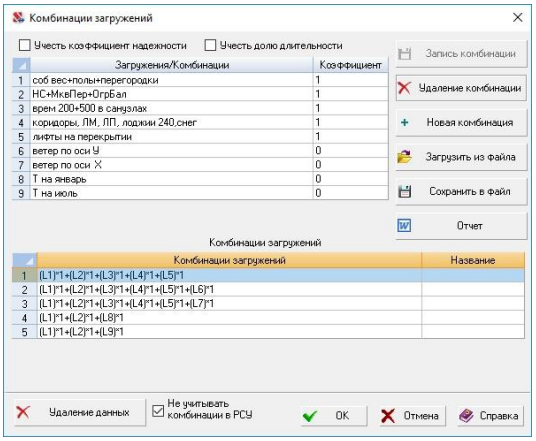



Рис. 17-1. *Диалоговое окно* **Комбинации загружений**

Комбинации загружений могут быть вычислены как в общем потоке расчета задачи, так и отдельно, после завершения расчета. В первом случае исходные данные готовятся после завершения формирования расчетной схемы и ввода загружений. Во втором — комбинации могут быть введены после завершения расчета по загружениям.

Режим подготовки исходных данных для вычисления комбинаций загружений вызывается из **Дерева проекта** в разделе **Специальные исходные данные**. Режим доступен только после задания загружений. Подготовка данных выполняется в диалоговом окне **Комбинации загружений** (рис. 17-1).

Порядок ввода данных:

- в столбце **Коэффициенты** ввести значения коэффициентов, с которыми загружения входят в текущую комбинацию;
- нажать кнопку **Запись комбинации**, после чего формула текущей комбинации выводится в информационное окно;

– нажать кнопку **Новая комбинация** и установить номер следующей комбинации, при этом коэффициенты получат нулевые значения, и программа будет готова к вводу новых данных.

При записи комбинации предусмотрена возможность учета для каждого входящего в нее загружения соответствующих им коэффициентов надежности по нагрузке и/или доли длительности. Деление коэффициентов, с которыми загружения входят в комбинацию, на коэффициент надежности по нагрузке и/или умножение этих коэффициентов на коэффициент доли длительности выполняется при активных соответствующих маркерах, расположенных в диалоговом окне **Комбинации загружений**. Это позволяет автоматизировать процесс создания комбинаций, которые соответствуют нормативным, длительным или нормативным длительным комбинациям. Описанные выше маркеры не следует использовать, если в комбинацию входят другие комбинации (последние будут при этом проигнорированы). Если в качестве нормативного документа по вычислению комбинаций нагрузок выбран EN 1990, то данные опции отсутствуют.

Следует отметить, что в комбинацию наряду с загружениями могут входить и ранее созданные комбинации. Текущая комбинация (ее номер указан в поле **Номер комбинации**) может быть удалена нажатием кнопки **Удаление комбинации,** а после нажатия кнопки **Удаление данных** будут удалены все заданные комбинации.



**При изменении *количества загружений* данные для расчета комбинаций загружений должны быть *уточнены*, т. к. некоторые комбинации могут быть удалены.**

В режиме **Монтаж** существуют ограничения на задание комбинаций: в комбинацию могут входить «независимые» загружения одной стадии монтажа. Базовое загружение будет добавлено ко всей комбинации автоматически, включая дополнения к базовому загружению (заданные в виде групп нагрузок) с указанными коэффициентами.



**Вычисленные значения перемещений и силовых факторов от комбинации, в которую входят динамические загружения, являются нелинейными и соответствуют различным моментам времени. При этом может не учитываться знак при суммировании. Возможна потеря равновесия в узлах.**

Кроме того, комбинации могут быть созданы на основе расчетных сочетаний усилий, сгенерированных в постпроцессоре **РСУ** с помощью операции **Создать комбинации загружений по РСУ** (кнопка —  ). Для этого используется кнопка **Загрузить из файла**, нажатие которой приводит к появлению стандартного окна **Open** (**Открыть**) среды Windows. Загружаемый файл с информацией о комбинациях имеет расширение **.rsu2comb**.

В режимах **Вариации моделей** и **Монтаж** могут быть заданы комбинации загружений как в рамках одной модели (стадии), так и с использованием загружений, относящихся к разным расчетным схемам (стадиям монтажа). Следует отметить, что комбинирование загружений, которые относятся к различным задачам, как правило, недопустимо, поскольку это нарушает принцип суперпозиции. Тем не менее, авторы оставили такую возможность (естественно, ответственность при этом лежит на пользователе) с той целью, чтобы можно было создать комбинацию типа "разность аналогичных загружений" и оценить различия напряженно-деформированного состояния различных моделей (стадий).

При задании РСУ программа предоставляет возможность использовать не только загружения, но и их комбинации. Если такая возможность не нужна, то рекомендуется при задании комбинаций загружений взвести маркер **Не учитывать комбинации в РСУ**.

# 18. Расчетные сочетания

## 18.1. Основные положения

Определить расчетные сочетания значит найти те сочетания отдельных загружений, которые могут быть решающими (наиболее опасными) для каждого проверяемого элемента, каждого сечения элемента для стержней и каждого узла.

В программе **SCAD** предусмотрены определения следующих расчетных сочетаний:

- расчетные сочетания усилий (РСУ);
- расчетные сочетания усилий прогрессирующего обрушения;
- расчетные сочетания прогибов (РСП);
- расчетные сочетания перемещений;
- расчетные сочетания реакций в связях (РСР);
- расчетные сочетания продавливания.

Основой выбора невыгодных расчетных сочетаний служит принцип суперпозиции, что предполагает выполнение расчетов, как для линейно работающей системы. Вместе с тем, результаты выбора невыгодных расчетных сочетаний усилий используются, например, для проверки прочности железобетонных конструкций, где работа сечения с трещинами при текучести арматуры является заведомо нелинейной. Возникает явное противоречие, для разрешения которого используется указание пункта 5.1.2 СНиП 52-01-2003: "... рекомендуется учитывать влияние физической нелинейности путем корректировки результатов линейного расчета на основе данных экспериментальных исследований, нелинейного моделирования, результатов расчета аналогичных объектов и экспертных оценок".

Используя принцип суперпозиции, выбираются невыгодные сочетания усилий, которые создают максимальные упругие напряжения в характерных точках или на характерных площадках конечных элементов. При этом для конечных элементов различного типа (стержневых, пластинчатых и т. п.) используется свой подход для назначения критериев выбора РСУ. Аналогично выбираются максимальные перемещения узлов.

Линейность подразумевает также, что некоторое загружение либо войдет в РСУ целиком, либо будет отброшено (если оно создает разгружающий эффект), и, таким образом, можно себе представить всего $2^n$ сочетаний (где $n$ — количество загружений), из которых следует сделать выбор. Нетрудно видеть, что при реальных значениях параметра $n$ количество возможных комбинаций становится настолько большим, что решение задачи прямым перебором вариантов оказывается нереальным, в связи с чем для решения этой экстремальной задачи использован специальный алгоритм.

Программа определяет сочетания как расчетного, так и нормативного НДС. Для найденных невыгодных (по тому или иному критерию) комбинаций *расчетных* значений вычисляются *длительные* (а также нормативные и нормативные длительные) значения соответствующих усилий, напряжений и перемещений. Программа производит также поиск невыгодных комбинаций *нормативных* значений и для них вычисляет расчетные, расчетные длительные и нормативные длительные значения соответствующих усилий, напряжений и перемещений и т.д.

Отметим, что при печати таблиц в информации об элементе/узле для каждого сочетания указывается тот критерий, который использовался при поиске невыгодного сочетания. При этом может возникнуть ситуация, при которой, например, указан критерий максимальных нормальных напряжений (использованный при анализе расчетных усилий), но набор соответствующих нормативных усилий уже не дает максимальное нормальное напряжение.

Нормы проектирования регламентируют ограничения нормативных значений перемещений, поэтому для каждого узла вычисляются только нормативные и нормативные длительные сочетания перемещений.

Нормы расчета бетонных и железобетонных конструкций требуют проведения расчета на продавливание для плоских железобетонных элементов (плит). **SCAD** позволяет вычислить невыгодные (с точки зрения продавливания) сочетания загружений. Вычисления производятся в узлах горизонтальных пластинчатых элементов, к которым примыкают вертикальные стержни.

Загружения, действующие на рассчитываемый объект, могут принадлежать в зависимости от продолжительности действия нагрузок к одному из следующих типов (согласно классификации СНиП):

- постоянные;
- длительные;
- кратковременные;
- особые.

Для упрощения алгоритма выбора сочетаний список типов расширен. В него добавлены крановые нагрузки (хотя в нормах они относятся к кратковременным) и неактивные, т. е. не участвующие в выборе невыгодных сочетаний. Например, «неактивной» можно сделать статическую составляющую ветровой нагрузки в случае задания динамического загружения "Ветровое воздействие", куда она войдет автоматически. Кроме того, в список кратковременных нагрузок включена нагрузка *Специальная, учитываемая при сейсмическом воздействии*, использование которой позволяет учесть требования отраслевых норм об учете дополнительной нагрузки, действующей одновременно с сейсмической.

Для корректного учета коэффициента надежности по нагрузке для каждого типа загружений предусмотрены соответствующие нормам списки видов нагрузки, например для постоянных нагрузок (вес конструкций и грунтов) используются данные таблицы 1 СНиП 2.01.07-85*, для длительных — таблиц 2 и 3 и т. д. Аналогичные таблицы коэффициентов надежности по нагрузке есть и в других нормативных документах. В тех случаях, когда коэффициент надежности по нагрузке не определяется однозначно, его должен задать пользователь.

Кроме коэффициента надежности по нагрузке, загружение характеризуется долей длительности и одновременностью действия входящих в него нагрузок. Это означает, что в рамках одного загружения корректно объединять нагрузки, у которых совпадают первые две характеристики и которые всегда действуют одновременно.

Наряду с загружениями в выборе расчетных сочетаний нагрузок могут участвовать и комбинации загружений. Каждая созданная комбинация может быть учтена в списке загружений. Очевидно, что тип загружения и вид нагрузки для комбинации назначает пользователь.

Нормами предусмотрено, что в зависимости от вида входящих в сочетания нагрузок, появляются понижающие коэффициенты.

В начальном состоянии таблиц с исходными данными всем загружениям и комбинациям присваивается тип «неактивное».



Расчет производится на основании выбранных пользователем норм проектирования. Смена норм проектирования может быть выполнена с помощью пункта **Настройки норм проектирования** меню ***Настройки***.

Расчетные сочетания могут быть вычислены как в общем потоке расчета задачи, так и отдельно, после завершения расчета на статические и динамические воздействия. В первом случае исходные данные готовятся после завершения формирования расчетной схемы и только после задания всех загружений, во втором — данные могут быть введены после завершения расчета по загружениям. Расчетные сочетания перемещений могут быть вычислены только после завершения основного расчета.



Расчетные сочетания нагрузок определяются для каждого элемента в отдельности (более того — для каждого сечения элемента) и при этом найденный набор комбинаций может не совпадать для различных элементов. Таким образом, для системы в целом мы получаем сочетания загружений, которые физически не действуют одновременно, поэтому нельзя построить «эпюру РСУ» или «изополя РСУ». Если к этому добавить, что каждому элементу соответствует не одно РСУ, а несколько, то указанная «невозможность» еще более усугубится. Заметим, что если пользователь желает увидеть результат одновременного действия нескольких загружений, то он должен воспользоваться режимом **Комбинации загружений**.

### Логические связи между загружениями

При определении расчетных сочетаний учитываются логические связи между загружениями, отражающими их физический смысл, и требования, регламентируемые различными нормативными документами. Можно выделить следующие типы логических связей:

- взаимоисключающие, которые не могут одновременно входить в одно сочетание (например, ветер слева и ветер справа, сейсмическое воздействие вдоль разных осей координат и т. п.);
- сопутствующие, когда загружения не могут самостоятельно попадать в расчетное сочетание без породившего их загружения. Усилия от торможения тележки крана не могут включаться в сочетание, если туда не вошли усилия от давления колес крана, хотя нагрузка от крана может действовать и без сочетания с тормозной. Аналогично, усилия от сейсмической нагрузки нельзя включить в сочетание без тех загружений (например, временных), которые вошли в состав массы конструкции, определившей динамические характеристики сейсмического движения, хотя временные нагрузки могут войти в сочетание и без сейсмики;
- одновременно действующие, например, ветровой напор и отсос, заданные в различных загружениях. При этом надо различать случаи, когда нагрузки обязательно действуют одновременно, а могут и действовать по отдельности.

Кроме того, в описании характеристик загружения предусмотрен признак знакопеременности (при одинаковом модуле вектора). Таковыми являются практически все динамические нагрузки.

Очевидно, что логические связи не могут быть противоречивыми:

- нельзя объединять постоянные и временные нагрузки;
- сопутствующее загружение не может иметь двух взаимоисключающих порождающих загружений и т. п.

## 18.2. Критерии РСУ

### Стержни

В качестве критерия определения РСУ здесь приняты экстремальные значения нормальных и касательных напряжений в контрольных точках сечения (рис. 18.2-1).

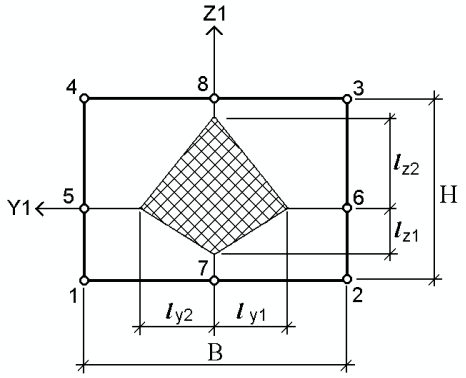



Рис. 18.2-1. *Прямоугольник, ограничивающий габариты произвольного сечения*

Для нормальных напряжений используется формула:

$$\sigma_k = \frac{N}{F} \pm \frac{M_y z_k}{I_y} \pm \frac{M_z y_k}{I_z}, \qquad (18.2.1)$$

где $k$ — точка сечения стержня ($k$ = 1…8). Эта формула преобразуется следующим образом при $y = \pm\frac{B}{2}$ и $z = \pm\frac{H}{2}$:

$$\sigma_k F = N \pm \frac{M_y}{l_{z,i}} \pm \frac{M_z}{l_{y,i}}, \qquad (18.2.2)$$

где $l_{y,i}$ и $l_{z,i}$ ядровые расстояния в сечении стержня ($i$ = 1, 2).

Такой подход позволяет определить экстремальные нормальные напряжения в сечении любой формы.

Для касательных напряжений используется приближенная формула:

$$\tau_y F = \frac{Q_y}{2} \pm \frac{M_{kp}}{2(l_{y1} + l_{y2})} \qquad \tau_z F = \frac{Q_z}{2} \pm \frac{M_{kp}}{2(l_{z1} + l_{z2})}. \qquad (18.2.3)$$

Нумерация критериев и соответствующих им напряжений, вычисленных по формулам (18.2.1, 18.2.3) приведена в табл. 18.2-1. Кроме напряжений вычисляются также экстремальные положительные и отрицательные значения продольной силы (критерии под номерами 17 и 18) и

перерезывающие силы (критерии под номерами 27…34), которые используются при подборе арматуры в элементах железобетонных конструкций и проверке несущей способности элементов стальных конструкций.

**Таблица 18.2-1**

| Критерий | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Значение | $\sigma_{1+}$ | $\sigma_{1-}$ | $\sigma_{2+}$ | $\sigma_{2-}$ | $\sigma_{3+}$ | $\sigma_{3-}$ | $\sigma_{4+}$ | $\sigma_{4-}$ | $\tau_{y7+}$ | $\tau_{y7-}$ |
| Критерий | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| Значение | $\tau_{y8+}$ | $\tau_{y8-}$ | $\tau_{z5+}$ | $\tau_{z5-}$ | $\tau_{z6+}$ | $\tau_{z6-}$ | $N^+$ | $N^-$ | $\sigma_{7+}$ | $\sigma_{7-}$ |
| Критерий | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 |
| Значение | $\sigma_{8+}$ | $\sigma_{8-}$ | $\sigma_{5+}$ | $\sigma_{5-}$ | $\sigma_{6+}$ | $\sigma_{6-}$ | $Q_{y+}$ | $Q_{y-}$ | $Q_{y+}$ | $Q_{y-}$ |
| Критерий | | | | | | | 31 | 32 | 33 | 34 |
| Значение | | | | | | | $Q_{z+}$ | $Q_{z-}$ | $Q_{z+}$ | $Q_{z-}$ |
| Критерий | | | | | | | 51 | 52 | 53 | 54 |
| Значение | | | | | | | $M_{y+}$ | $M_{y-}$ | $M_{z+}$ | $M_{z-}$ |

Для поиска невыгодного значения эксцентриситета используется критерий

$$\sigma F = N \pm \frac{M_y}{l_{z,i}} \sin\frac{n\pi}{8} \pm \frac{M_z}{l_{y,i}} \sin\frac{m\pi}{8}, \qquad (18.2.4)$$

где n, m=0, 1, 2, 3, 4.

Данный критерий важен для железобетонных конструкций.

Критерии, вычисленные по формуле (18.2.4), имеют трехзначные номера в соответствии с табл. 18.2-2.

**Таблица 18.2-2**

| Номер критерия | 1nm | 2nm | 3nm | 4nm | 5nm | 6nm | 7nm | 8nm |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Значение | $\sigma_{++}$ | $-\sigma_{++}$ | $\sigma_{+-}$ | $-\sigma_{+-}$ | $\sigma_{-+}$ | $-\sigma_{-+}$ | $\sigma_{--}$ | $-\sigma_{--}$ |

Так, например, критерий с номером 532 означает максимальное значение величины

$$N - \frac{M_y}{l_{z,i}} \sin\frac{3\pi}{8} + \frac{M_z}{l_{y,i}} \sin\frac{2\pi}{8}.$$

## Мембраны (плоское напряженное состояние)

В общем случае главные напряжения в одной и той же точке конструкции при различных загружениях имеют различную ориентацию, поэтому их использование в качестве критерия отбора РСУ невозможно. Поэтому здесь определение РСУ производится по значениям нормальных и касательных напряжений, возникающих на различным образом ориентированных площадках (ориентация задается значением угла $\alpha$ в центре тяжести конечного элемента). Расчет выполняется по формулам:

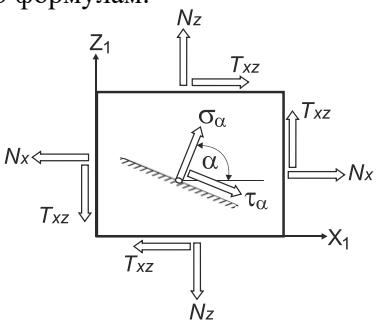



Рис. 18.2-2.

$$\sigma(\alpha) = N_x \cos^2\alpha + N_z \sin^2\alpha + T_{xz} \sin 2\alpha; \qquad (18.2.5)$$

$$\tau(\alpha) = \frac{1}{2}\left(N_z - N_x\right) \sin 2\alpha + T_{xz} \cos 2\alpha. \qquad (18.2.6)$$

Обозначения приведены на рис. 18.2-2. Нормальные напряжения вычисляются с фиксированным шагом просмотра угла.

### Плиты

Здесь применяется подход, аналогичный тому, который описан выше для мембран. Изгибные и крутящий моменты в плите дают возможность определить нормальные и касательные напряжения на верхней и нижней поверхностях плиты. Эти напряжения по модулю равны, поэтому по аналогии с формулами (18.2.5) и (18.2.6) можно записать выражения для моментов, создающих экстремальные напряжения

$$M(\alpha) = M_x \cos^2\alpha + M_y \sin^2\alpha + M_{xy} \sin 2\alpha\,; \tag{18.2.7}$$

$$M_k(\alpha) = \frac{1}{2}\left(M_y - M_x\right) \sin 2\alpha + M_{xy} \cos 2\alpha\,. \tag{18.2.8}$$

Вычисляются также экстремальные значения перерезывающих сил.

### Оболочки

Вычисляются напряжения на верхней и нижней поверхностях оболочки с учетом мембранных напряжений и изгибающих усилий по следующим зависимостям:

$$\begin{aligned}
\sigma_x^{\text{Н/В}} &= N_x \pm \frac{6M_x}{h^2};\\
\sigma_y^{\text{Н/В}} &= N_y \pm \frac{6M_y}{h^2};\\
\tau^{\text{Н/В}} &= T_{xy} \pm \frac{6M_{xy}}{h^2},
\end{aligned} \tag{18.2.9}$$

где $h$ — толщина оболочки; В и Н — индексы, означающие принадлежность к верхней и нижней поверхностям.

По вычисленным напряжениям по формулам (18.2.5-18.2.6) вычисляются значения критериев для оболочечных элементов. Вычислим момент $M$ по формуле (18.2.7) и напряжение $N$ по формуле (18.2.5). Если $N$ не равен нулю, то вычисляется значение эксцентриситета $\varepsilon = M/N$.

Определяются также экстремальные значения перерезывающих сил.

### Специальные элементы

В качестве критерия определения РСУ здесь приняты положительные и отрицательные экстремальные значения усилий, возникающие в элементах.

### Объемные и осесимметричные элементы

В качестве критерия определения РСУ приняты экстремальные значения компонентов тензора напряжений и главных напряжений.

### Нумерация критериев РСУ

Для **стержней** используются номера критериев, приведенные в табл. 18.2-1 и 18.2-2.

Для **мембран**, **плит** и **оболочек** вычисления проводятся по формулам 18.2.3-18.2.9 при заданном в исходных данных шаге просмотра, который может принимать значения 3, 5, 7.5, 9, 15, 22.5, и 45°. Диапазон изменения угла $\alpha$ от 0° до 180° для нормальных напряжений и от 0° до 90° для касательных. По умолчанию предлагается шаг просмотра в 15°. При этом номера критериев и соответствующих им углов приведены в табл. 18.2-3, где nnn – угол, а индексы «Н» и «В» соответствуют нижней и верхней поверхностям оболочки.

**Таблица 18.2-3**

| Номер критерия | 0 | 1nnn | 2nnn | 3nnn | 4nnn | 5nnn | 6nnn | 7nnn | 11nnn | 12nnn | 8001 | 8002 | 8003 | 8004 | 8005 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| мембраны | $\sigma$ | $-\sigma$ | $\tau$ | $-\tau$ | | | | | | | | | | | |
| плиты | M | -M | $M_к$ | $-M_к$ | | | | | | | $Q_x$ | $-Q_x$ | $Q_y$ | $-Q_y$ | $\lvert Q_x\rvert+\lvert Q_y\rvert$ |
| оболочки | $\sigma_н$ | $-\sigma_н$ | $\tau_н$ | $-\tau_н$ | $\sigma_в$ | $-\sigma_в$ | $\tau_в$ | $-\tau_в$ | $\varepsilon$ | $-\varepsilon$ | $Q_x$ | $-Q_x$ | $Q_y$ | $-Q_y$ | $\lvert Q_x\rvert+\lvert Q_y\rvert$ |

Так, например, номер критерия 6075, означает, что в оболочке вычислено $\tau$ на верхней поверхности для угла 75°.

Для **объемных** и **осесимметричных** элементов нумерация критериев приведена в табл. 18.2-4, где $\sigma_i$, $i$=1,2,3 – главные напряжения.

**Таблица 18.2-4**

| Критерий | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Значение | $\sigma_{x+}$ | $\sigma_{x-}$ | $\sigma_{y+}$ | $\sigma_{y-}$ | $\sigma_{z+}$ | $\sigma_{z-}$ |
| Критерий | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| Значение | $\tau_{xy+}$ | $\tau_{xy-}$ | $\tau_{xz+}$ | $\tau_{xz-}$ | $\tau_{yz+}$ | $\tau_{yz-}$ |
| Критерий | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
| Значение | $\sigma_{1+}$ | $\sigma_{1-}$ | $\sigma_{2+}$ | $\sigma_{1-}$ | $\sigma_{3+}$ | $\sigma_{3-}$ |

## 18.3. Критерии РСП

В качестве критериев определения расчетных сочетаний перемещений приняты экстремальные значения перемещений узла по осям X, Y, Z. К ним добавлены критерии, обеспечивающие поиск экстремального суммарного перемещения и экстремального горизонтального смещения.

## 18.4. Критерии расчетных сочетаний прогибов

В каждом расчетном сечении стержня невыгодные сочетания прогибов определяются на основании следующих критериев:

*max* X и *min* X;
*max* Y и *min* Y;
*max* Z и *min* Z;
$max\sqrt{X^2+Y^2+Z^2}$ и $max\sqrt{X^2+Y^2}$,

где:
X, Y, Z — значения прогибов в сечении в общей системе координат.

## 18.5. Критерии расчетных сочетаний реакций в связях

В качестве критериев определения расчетных сочетаний реакций в связях приняты:

*max* $R_X$ и *min* $R_X$;
*max* $R_Y$ и *min* $R_Y$;
*max* $R_Z$ и *min* $R_Z$;
*max* $R_{UX}$ и *min* $R_{UX}$;
*max* $R_{UY}$ и *min* $R_{UY}$;
*max* $R_{UZ}$ и *min* $R_{UZ}$;
$max\sqrt{R_X{}^2+R_Y{}^2+R_Z{}^2}$ и $max\sqrt{R_X{}^2+R_Y{}^2}$;
$max\sqrt{R_{UX}{}^2+R_{UY}{}^2+R_{UZ}{}^2}$ и $max\sqrt{R_{UX}{}^2+R_{UY}{}^2}$,

где:
$R_X$, $R_Y$, $R_Z$ — реакции вдоль осей X, Y, Z общей системы координат;
$R_{UX}$, $R_{UY}$, $R_{UZ}$ — реакции вокруг осей X, Y, Z общей системы координат.

## 18.6. Критерии расчетных сочетаний продавливания

При вычислении расчетных сочетаний продавливания программа определяет все узлы, которые принадлежат горизонтальным пластинам и вертикальным (и только вертикальным) стержням. Для каждого такого узла вычисляются нагрузки в узле на горизонтальную плиту для каждого загружения и комбинации загружений. После чего производится определение невыгодных сочетаний расчетных нагрузок. Используются правила комбинирования, которые оговорены выбранными нормами проектирования. В качестве критериев определения расчетных сочетаний приняты:

*max* $R_X$ и *min* $R_X$;
*max* $R_Y$ и *min* $R_Y$;
*max* $R_Z$ и *min* $R_Z$;
*max* $R_{UX}$ и *min* $R_{UX}$;

*max* $R_{UY}$ и *min* $R_{UY}$;
*max* $R_{UZ}$ и *min* $R_{UZ}$;
*max* $\sqrt{R_X^2 + R_Y^2 + R_Z^2}$ и *max* $\sqrt{R_X^2 + R_Y^2}$;
*max* $\sqrt{R_{UX}^2 + R_{UY}^2 + R_{UZ}^2}$ и *max* $\sqrt{R_{UX}^2 + R_{UY}^2}$,

где:
$R_X$, $R_Y$, $R_Z$ — нагрузки вдоль осей X, Y, Z общей системы координат;
$R_{UX}$, $R_{UY}$, $R_{UZ}$ — нагрузки вокруг осей X, Y, Z общей системы координат.

## 18.7. Подготовка данных

Операция подготовки данных вызывается из **Дерева проекта** в разделе **Специальные исходные данные**, подраздел **Расчетные сочетания усилий**. Данные едины для всех перечисленных выше видов расчетных сочетаний.

Диалоговое окно **Расчетные сочетания усилий и перемещений** (рис. 18.7-1) включает следующие элементы управления:

- пиктограмму, указывающую нормативный документ, на основании которого производится расчет сочетаний (подведя мышь к данной пиктограмме можно увидеть всплывающее окно с наименованием нормативного документа);
- таблицу с характеристиками загружений;
- группу кнопок **Параметры**, для вызова диалоговых окон, в которых задаются характеристики групп элементов;
- группу кнопок **Связи загружений**, для вызова диалоговых окон, в которых описываются связи между загружениями;
- кнопка **Активировать/Деактивировать загружение**, для блокировки загружения (временного исключения из списка загружений), например, эту опцию рекомендуется использовать в отношении температурных загружений в тех случаях, когда расстановка температурных швов соответствует требованиям норм проектирования, или для исключения из расчетных сочетаний пробных загружений;
- выпадающий список, для задания шага (угла) анализа площадок в пластинах;
- кнопки управления окном.

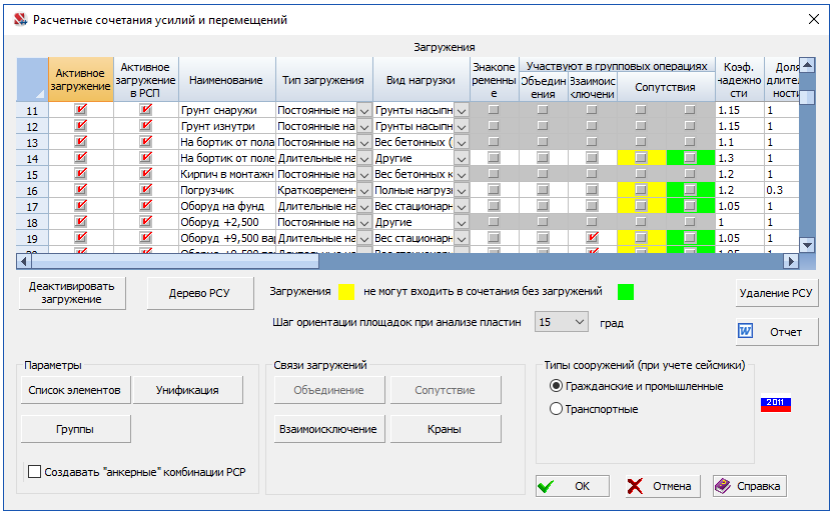



Рис. 18.7-1. *Диалоговое окно* **Расчетные сочетания усилий и перемещений**

При первичном заполнении данных в таблице с характеристиками загружений будет сформировано столько строк, сколько загружений в задаче плюс количество комбинаций загружений. Если при задании комбинаций загружений будет отмечено "Не учитывать комбинации в РСУ" (см. главу 17), то останутся только строки загружений.

Таблица включает следующие графы:

**Активное загружение** — маркеры этой графы позволяют исключить некоторые загружения из анализа при формировании расчетных сочетаний усилий и перемещений. По умолчанию все маркеры активны, т.е. все загружения участвуют в расчете.

**Активное загружение в РСП** — эти маркеры работают аналогично маркерам предыдущей графы, но исключают загружения из анализа только при формировании расчетных сочетаний перемещений;

**Наименование** — в этой графе указывается имя загружения или формула комбинации;

**Тип загружения** — список предусмотренных нормами типов загружений: постоянные, длительные, кратковременные, крановые, особые или неактивные. Если загружение отмечено как неактивное, то оно не участвует в формировании расчетных сочетаний;

**Вид нагрузки** — в графе из списка выбирается вид нагрузки, в соответствии с установленным в предыдущей графе типом. Так, например, для кратковременных нагрузок (при расчетах по СНиП 2.01.07-85*) предлагается следующий список:

*Нагрузки от оборудования в нестационарном режиме работы*
*Вес людей и ремонтных материалов в зонах обслуживания*
*Полные нагрузки на перекрытия жилых, общественных и производственных зданий*
*Полные нагрузки от подвижного подъемно-транспортного оборудования*
*Полные снеговые нагрузки в III снеговом районе*
*Полные снеговые нагрузки в IV снеговом районе*
*Полные снеговые нагрузки в V и VI снеговых районах*
*Полные снеговые нагрузки в других районах*
*Полные температурные климатические воздействия*
*Ветровые нагрузки*
*Гололедные нагрузки*
*Многократного воздействия*
*Нагрузки от подвижного состава железных дорог*
*Нагрузки от подвижного состава автомобильных дорог*
*Другие*

После выбора для данного загружения соответствующего вида нагрузки в графах **Коэффициент надежности** и **Доля длительности** будут показаны значения коэффициента надежности и доли длительности, которые можно откорректировать. Если значения данных коэффициентов не определены нормативными документами, то их необходимо задать. Если в качестве нормативного документа по вычислению комбинаций нагрузок выбран EN 1990, то данные коэффициенты не задаются.

Графа **Знакопеременные** — свойство нагрузки (чаще всего динамической) назначается путем активации маркера в одноименной графе таблицы.

Группа граф, объединенных под общим наименованием **Участвуют в групповых операциях**, включает графы **Объединения**, **Взаимоисключения** и **Сопутствия**.

Графа **Объединения** — маркерами, установленными в этой графе, отмечаются загружения и комбинации, которые в процессе **формирования** сочетаний могут выступать как:

а) совместно действующие;

б) независимые, но при одновременном действии выступающие как одна нагрузка (п. 1.13 СНиП 2.01.07-85*).

При этом, наличие маркера в строке загружения говорит только о том, что загружение участвует в операции объединения. Конкретные „партнеры” указываются в таблице диалогового окна **Одновременно действующие загружения** (рис. 18.7-2). В этом окне работа маркеров строится по схеме двух щелчков. Первым щелчком („птичкой”) отмечаются загружения, которые относятся к виду *а*), а вторым (крестиком) — к виду *б*).

Графа **Взаимоисключения** — маркеры этой графы отмечают загружения, которые не могут **входить** в одно сочетание. Аналогично предыдущей графе активные маркеры этой графы указывают только на факт участия загружения в операциях взаимоисключения, а само назначение групп таких загружений выполняется в диалоговом окне, показанном на рисунке 18.7-3. Маркер **Все** позволяет установить все маркеры в таблице одним щелчком мыши.

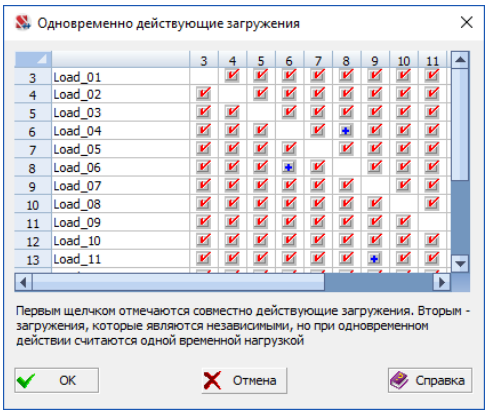



Рис. 18.7-2. *Диалоговое окно* **Одновременно действующие загружения**

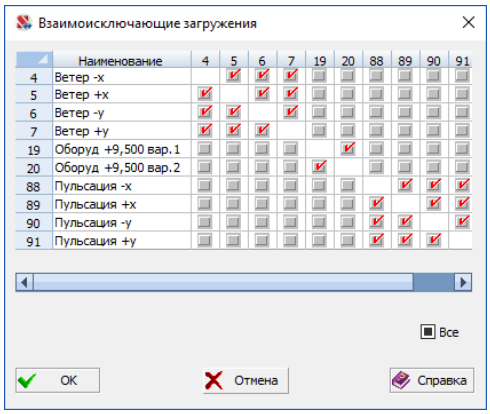
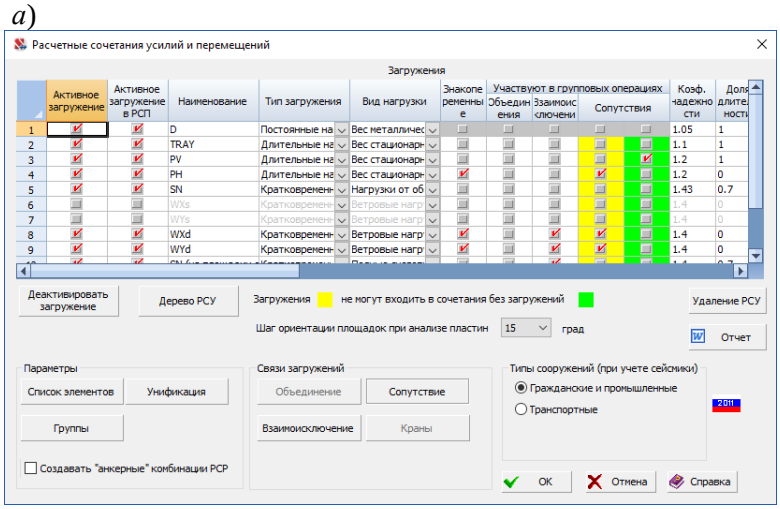



Рис. 18.7-3. *Диалоговое окно* **Взаимоисключающие загружения**

**В соответствии с требованиями СНиП особые загружения (к которым относятся и сейсмические воздействия) являются взаимоисключающими. Это правило реализуется в программе автоматически. Но ввиду того, что сейсмические воздействия можно задать в виде трех компонент по ортогональным направлениям, допускается для одного и того же типа сейсмического динамического воздействия описывать их одновременно действующими, и тем самым реализовать требования СНиП (см., например, п. 5.4 СП 14.13330.2014) о совместном учете вертикальной и горизонтальной сейсмических нагрузок. Суммирование данных загружений выполняется по правилам соответствующих нормативных документов.**

*а*)




*б*)

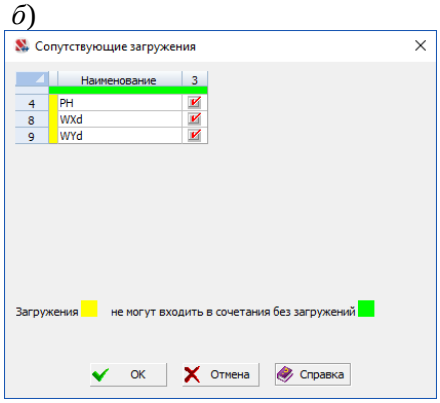



Рис. 18.7-4. *Диалоговое окно* **Расчетные сочетания усилий и перемещений** (*а*) и соответствующее ему окно **Сопутствующие загружения** (*б*)

Графа **Сопутствия** — эта графа предназначена для описания операций сопутствия, т. е. такой связи между загружениями, при которой некоторые загружения (назовем их вида ”s”) не могут попасть в сочетание без других загружений (вида “m”), помеченных как сопутствующие. Например, загружения, включающие нагрузки от сейсмического воздействия, не могут попасть в сочетание без загружений, нагрузки которых использовались при назначении масс (собственный вес, стационарное оборудование и т. п.). В то же время, загружения вида “m” могут самостоятельно входить в сочетания. Графа разделена на два столбца, отмеченных соответственно желтым и зеленым цветами. Маркеры “желтого” столбца используются для отметки загружений вида “s”, а “зеленого” — вида “m”. Аналогично предыдущим графам этой группы активные маркеры

указывают на участие загружения в операциях сопутствия. При этом загружение не может быть одновременно отмечено в желтом и зеленом столбцах, т. е. должно иметь определенный статус (рис. 18.7-4).

Отношения сопутствия задаются в диалоговом окне **Сопутствующие загружения**. В строках записываются загружения вида “s” (они помечены желтым цветом), в столбцах — загружения типа “m” (помечены зеленым цветом). В случае если загружение в некоторых операциях сопутствия должно относиться к типу “s”, а в других — к типу “m”, его следует продублировать (сделав основное загружение и дубль взаимоисключающими).

Графа **Коэффициент надежности по нагрузке** — значение этого коэффициента ($\gamma_f$) автоматически выставляется в соответствующей графе в зависимости от типа загружения и вида нагрузки и при необходимости может быть изменено пользователем. В тех случаях, когда это значение однозначно не определено нормами, в графе выставляется знак вопроса, который необходимо заменить на конкретное число. Коэффициент используется для перехода от расчетных к нормативным значениям нагрузок при расчете элементов железобетонных конструкций по второму предельному состоянию. Очевидно, что в загружении при задании расчетных нагрузок должен был использоваться коэффициент с тем же значением. Кроме того, в одном загружении не должно быть нагрузок, имеющих разные значения коэффициента, например, вес элементов железобетонных конструкций ($\gamma_f = 1{,}1$) не может попасть в одно загружение с весом выравнивающих слоев перекрытий ($\gamma_f = 1{,}3$).

При первой загрузке диалогового окна **Расчетные сочетания усилий и перемещений** в данной графе будут приведены значения коэффициентов, которые были заданы при формировании загружений. При изменении пользователем значения коэффициента в указанном диалоговом окне оно будет автоматически изменено и в диалоговом окне **Сохранение загружения**.

Графа **Доля длительности** — в этой графе задается коэффициент длительной части для временных и кратковременных нагрузок. Значение коэффициента выставляется автоматически в зависимости от типа загружения и вида нагрузки и может быть изменено пользователем. При первом старте в данной графе будет значение коэффициента, которое было задано при формировании загружения. При изменении пользователем значения коэффициента будет изменен и коэффициент в загружении.

В группе **Типы сооружений (при учете сейсмики)** следует указать, является рассчитываемое сооружение транспортным или гражданским/промышленным. На основании этой информации будут выбраны соответствующие коэффициенты сочетаний на основании требований норм (см., например, п. 8.1.14 ДБН В.1.1-12:2014 или п. 8.3.17 СП 268.1325800.2016).

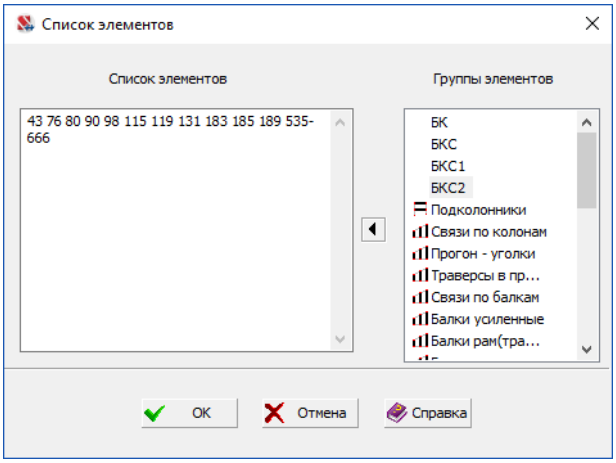



Рис. 18.7-5. *Диалоговое окно* **Список элементов**

**Дополнительные коэффициенты для групп элементов** — вслед за графой со значением коэффициента длительной части расположены 14 граф, в которых задаются дополнительные коэффициенты, на которые умножаются значения усилий/напряжений. В этом случае в зависимости от количества ненулевых дополнительных коэффициентов будет сформировано

соответствующее количество независимых сочетаний усилий. По умолчанию заполняется только первая графа коэффициентов значением единица, т.к. коэффициенты комбинации строятся автоматически в соответствии с нормативными документами. Используя механизм групп РСУ (см. ниже) данные коэффициенты можно применять, например, с целью раздельного поиска РСУ для стальных и железобетонных элементов, у которых различаются требования по надежности.

В тех случаях, когда расчетные сочетания усилий необходимо вычислить не для всех элементов схемы, следует воспользоваться кнопкой **Список элементов**, после нажатия которой появляется диалоговое окно **Список элементов** (рис. 18.7-5).

Элементы могут быть введены с использованием групп элементов. При этом доступны как группы, заданные для подбора арматуры, так и другие группы элементов. Если список вводится без использования групп или корректируется после ввода групп, то он готовится по следующим правилам:

- номера элементов вводятся через пробел;
- в случае подряд пронумерованных элементов первый и последний элементы ряда пишутся через дефис (например: 1-23 34 45 76 87-125).

## Особенности задания сочетаний для EN 1990

Если в качестве нормативного документа по вычислению комбинаций нагрузок выбран EN 1990, то используется классификация загружений (тип загружения и вид нагрузки), которая соответствует данному нормативному документу. Кроме того, в этом случае не реализованы группы РСУ, и вместо коэффициентов $K_1$,$K_2$,... следует для каждого загружения задать коэффициенты $\gamma_{Sup}$, $\gamma_{Inf}$, $\gamma_Q$, $\psi_0$, $\psi_1$, $\psi_2$.

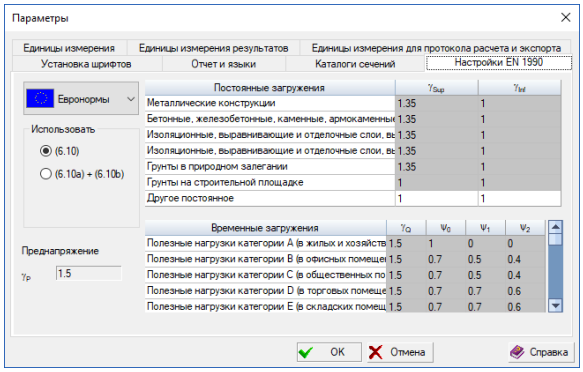
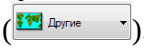



Рис. 18.7-6. *Страница* **Настройки EN 1990**

В диалоговом окне **Расчетные сочетания усилий и перемещений** появляется кнопка, нажатие которой приводит к появлению страницы **Настройки EN 1990** (рис. 18.7-6) позволяющей выбрать коэффициенты сочетаний загружений в соответствии с рекомендациями EN 1990 и национальных приложений стран, список которых содержится в соответствующем выпадающем списке.

Если значения коэффициентов или параметров расчета назначаются пользователем произвольно, тогда в выпадающем списке необходимо выбрать строку, помеченную как **Другие** ( 

). Таким образом, обеспечивается возможность использования программы в нестандартных ситуациях, а также при изменениях, вносимых в NAD.

## Особенности задания сочетаний для вариаций моделей, монтажа и нелинейных задач

При расчете вариаций моделей взаимоисключения между загружениями, которые соответствуют различным моделям пакета, устанавливаются автоматически. Это замечание относится и к загружениям различных стадий монтажа. Если указано, что взаимоисключения в вариациях моделей будут устанавливаться автоматически, то при формировании данных о взаимоисключении загружений для таких задач в соответствующем диалоговом окне "матрица" загружений будет иметь "блочную" структуру (рис. 18.7-7.).

Отказываться от автоматического взаимоисключения при расчете вариаций моделей следует очень осторожно, поскольку (в общем случае) неприменим принцип суперпозиции, на котором основано вычисление расчетных сочетаний.

Для нелинейных задач также предусмотрено вычисление сочетаний усилий. Это нужно для того, чтобы результаты нелинейного расчета можно было использовать при подборе/экспертизе стальных и/или железобетонных конструкций. Причина состоит в том, что при расчете по нормам нужно знать, в частности, нормативные и расчетные значения усилий, длительную часть, ... Функция подготовки соответствующих данных вызывается из **Дерева проекта** в разделе **Специальные исходные данные**, подраздел **Расчетные сочетания усилий при моделировании нелинейных нагрузок**. Диалоговое окно аналогично описанному выше для случая обычных сочетаний. Разница состоит в том, что все загружения являются взаимоисключающими и отсутствуют средства назначения объединения и сопутствия.

*а*) *б*)

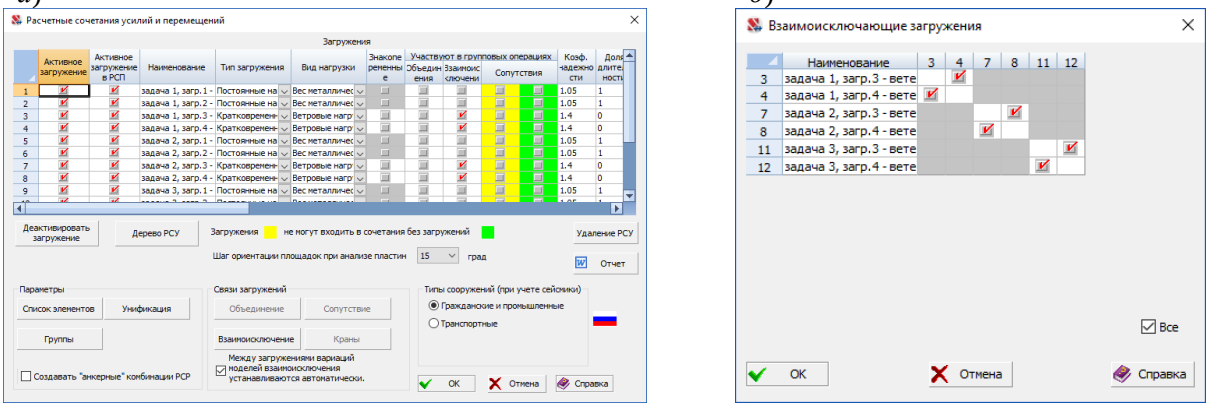



Рис. 18.7-7. *Диалоговое окно* **Расчетные сочетания усилий и перемещений** (*а*) в режиме **Вариация моделей** и соответствующее окно **Взаимоисключающие загружения** (*б*)

При рассмотрении нелинейных задач нужно иметь в виду, что в программе переход от нормативных значений к расчетным (и обратно), а также выделение длительной части реализуется умножением или делением результата нелинейного расчета на коэффициент надежности по нагрузке и на коэффициент длительности. Для нелинейной задачи это следует рассматривать как приближенный прием, реализующий требования норм проектирования, которые сформулированы для линейных задач.

В большинстве случаев этот прием дает небольшую погрешность, однако в особо ответственных случаях рекомендуется уточнить решение. Это можно сделать, если в задании на нелинейный расчет, который проводится для расчетного значения нагрузки, предусмотреть выдачу промежуточных результатов, соответствующих длительной части и нормативному значению нагрузки.

### Учет пульсационной составляющей ветровой нагрузки

Если пользователь решил рассмотреть отдельно статическое и полное (статика и динамика) ветровые загружения, то возможность их совместного появления в РСУ будет исключена автоматически. Если необходимо рассмотреть только полное динамическое загружение, то статическое загружение следует сделать *неактивным*.

### Крановые нагрузки

Учитывая особенности задания крановых нагрузок, они выделены в самостоятельный тип загружений и им соответствует «собственный» список видов нагрузки, который включает:

- пониженные вертикальные нагрузки от мостовых и подвесных кранов;
- полные вертикальные нагрузки от мостовых и подвесных кранов;
- торможение вдоль кранового пути;
- торможение «слева» груз «слева»;

- торможение «слева» груз «справа»;
- торможение «справа» груз «справа»;
- торможение «справа» груз «слева»;
- крановая при сейсмическом воздействии.

Дополнительная информация, необходимая для формирования расчетных сочетаний с учетом крановых нагрузок, задается в диалоговом окне **Крановые нагрузки** (рис. 18.7-8), где для каждой строки задаются номер крана, к которому она относится, и режим его работы.

В окне назначается максимальное количество одновременно учитываемых кранов и тормозных загружений, которые могут входить в сочетание.

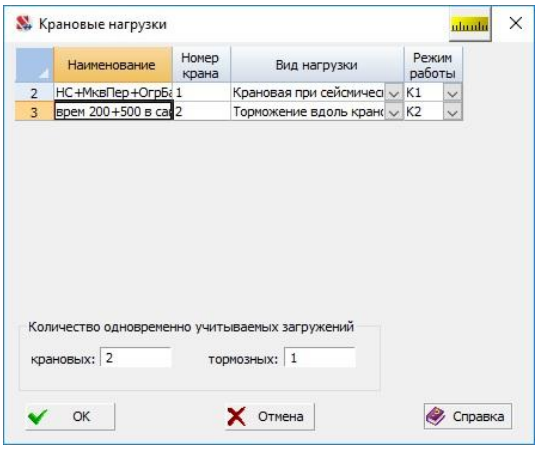



Рис. 18.7-8. *Диалоговое окно* **Крановые нагрузки**

Имея информацию о видах крановой нагрузки и зная номер крана, к которому относится та или иная нагрузка, программа может учесть следующие логические особенности взаимодействия:

- все вертикальные нагрузки, относящиеся к одному и тому же крану, являются взаимоисключающими (они относятся к разным позициям моста крана и крановой тележки);
- выполняются ограничения по количеству одновременно учитываемых кранов и по коэффициенту их сочетаний в соответствии с указанным нормативным документом (например, по п.4.14 СНиП 2.01.07-85* или п.9.16 СП 20.13330.2011);
- горизонтальная крановая нагрузка не может возникнуть без вертикального давления;
- тормозные нагрузки разного типа являются взаимоисключающими;
- крановая при сейсмическом воздействии является специально сконструированным загружением, соответствующим правилам из норм “Строительство в сейсмических районах”, она не может действовать совместно с тормозными силами. Все остальные крановые нагрузки взаимоисключаются с сейсмическими автоматически;
- при подсчете числа одновременно действующих временных нагрузок все компоненты крановой нагрузки одного и того же крана засчитываются как одна временная нагрузка (см. например, п. 1.13 СНиП 2.01.07-85* или п. 6.6 СП 20.13330.2011).

Для одного крана можно задавать любое количество загружений одного вида. При задании информации о тормозных нагрузках необходимо следить за корректностью ссылок на виртуальные номера кранов, чтобы обеспечить правильное задание положения груза.

**Для крановых нагрузок взаимоисключения и сопутствие всех загружений, относящихся к одному крану устанавливаются автоматически, и задавать их не обязательно. Для указания взаимодействия крана с другими загружениями задачи (например, кранами) достаточно указать связь с одним любым описывающим его действие загружением.**

Указание на номер крана является важной информацией еще и потому, что позволяет различать два принципиально важных случая:

а) на конструкции действительно работают разные краны (реально различные краны);

б) имеются различные позиции расположения крана или его крановой тележки (виртуально различные краны).

В первом случае разные краны могут действовать одновременно, хотя могут иметь место ограничения на их взаимное положение, которые определяются задаваемыми условиями взаимоисключения, во втором случае все варианты нагрузок от виртуально разных кранов являются взаимоисключающими, что должно быть явно указано. При этом в условиях взаимоисключения достаточно указать **любую пару** видов нагрузки, все другие окажутся взаимоисключающими автоматически.

### Унификация

При определении расчетных сочетаний нагрузок предусмотрена возможность унификации в рамках заданных списков (групп) элементов. Это значит, что предлагается пренебречь различиями в экстремальных значениях напряжений, реализующихся в различных элементах и в различных сечениях этих элементов, и следует найти наихудшее значение по всем унифицированным элементам и их сечениям. Реализованы три типа унификации:

- в группе элементов сечения унифицируются таким образом, что все элементы группы имеют одинаковое сечение;
- в группе элементов выполняется унификация по соответствующим сечениям, т. е. элементы группы будут иметь одинаковые первое, второе, третье и т. д. сечения;
- в группе элементов унифицируются симметричные сечения, т. е. все элементы группы будут иметь одинаковые первое и последнее сечения, второе и предпоследнее и т. д.

Очевидно, что для пластинчатых и оболочечных элементов, а также для элементов, включаемых в состав одного физического стержня (конструктивного элемента), может использоваться только первый тип унификации (если выбран иной тип, то для пластин программа будет использовать первый тип унификации). При этом в одну группу могут входить только те элементы, у которых одинаковая не только форма сечения, но и ориентация местных осей.

Несмотря на то, что в процессе формирования РСУ не выполняется проверка сечений стержневых элементов, попавших в одну группу унификации, рекомендуется создавать группы таким образом, чтобы все элементы одной группы имели одинаковую форму сечения.

Данные для унификации РСУ задаются в диалоговом окне **Унификация** (рис. 18.7-9). При вводе новых данных рекомендуется следующий порядок действий:

- нажать кнопку **Новый список (элементов)**;
- выбрать вид унификации из одноименного списка;
- установить номер группы унификации из списка **Группы унификации**;
- ввести список элементов или загрузить созданные ранее группы;
- нажать кнопку **Сохранить**.

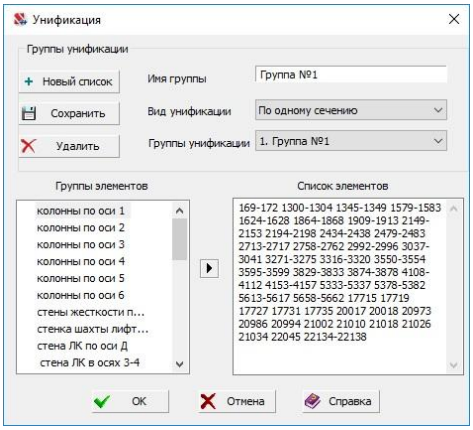



Рис. 18.7-9. *Диалоговое окно* **Унификация**

Для внесения изменений в ранее созданный список или в его характеристики следует:

- в списке **Группы унификации** выбрать номер модифицируемой группы;

– внести изменения в характеристики списка;
– запомнить изменения, нажав кнопку **Сохранить**.

Для удаления ранее созданного списка выбираем его и нажимаем кнопку **Удалить**.

Унификация производится только при вычислении РСУ и данные о группах унификации игнорируются при вычислении других типов расчетных сочетаний.

## Группы для РСУ

В практике возможны случаи, когда для разных элементов схемы требуется применить разные коэффициенты сочетаний, с которыми войдет в сочетание одно и то же загружение. Такие элементы объединяются в группы рис. 18.7-9 (не путать с группами элементов, создаваемыми при формировании расчетной схемы и анализе результатов, для задания которых используется диалоговое окно **Группы РСУ**).

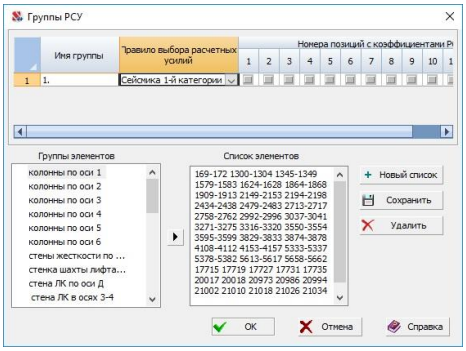



Рис. 18.7-10. *Диалоговое окно* **Группы РСУ**

Порядок работы в этом окне в основном совпадает с описанным выше для окна **Унификация** — нажать кнопку **Новый список**, ввести номера элементов, назначить номера столбцов, из которых выбираются коэффициенты РСУ, и нажать кнопку **Сохранить**.

В таблице, помещенной в верхней части окна, отмечаются номера столбцов, из которых следует взять коэффициенты РСУ для текущей группы элементов. Напомним, что эти коэффициенты задаются в столбцах таблицы в диалоговом окне **Расчетные сочетания усилий** (см. рис. 18.7-1).

При работе с группами (рис. 18.7-10) есть их дополнительная характеристика: «Правило выбора расчетных усилий», в котором задается вид строительных конструкций по табл. П.4.1 «Норм проектирования сейсмостойких атомных станций (НП-031-01)», которые устанавливают особые правила комбинирования сейсмических нагрузок, действующих по разным направлениям. Если задать как одновременно действующие три сейсмических загружения по направлениям X, Y и Z, то постпроцессор автоматически переберет все указанные в нормативном документе комбинации.

Так, например, для конструкций зданий (сооружений) 1-й категории сейсмостойкости будут автоматически построены комбинации:

$$\pm (N_x \pm 0.4\, N_y \pm 0.4\, N_z),$$
$$\pm (N_y \pm 0.4\, N_x \pm 0.4\, N_z),$$
$$\pm (N_z \pm 0.4\, N_x \pm 0.4\, N_y),$$
$$\pm \sqrt{\left(N_x^2 + N_y^2 + N_z^2\right)},$$

где $N_x$, $N_y$ и $N_z$ – критерии для сейсмических загружений по соответствующим направлениям. При этом в случае четвертой комбинации (корень квадратный) к номерам критериев будет добавлено 10000.

**При расчетах по СП РК 2.03-3-2017 в приведенных выше формулах используется коэффициент 0.3 вместо 0.4.**

Если в качестве нормативного документа по вычислению комбинаций нагрузок выбран EN 1990, то группы РСУ не реализованы.

Кнопка **Дерево РСУ** вызывает диалоговое окно (рис. 18.7-11), в котором графически (в виде дерева) представлены логические взаимосвязи между загружениями и которое позволяет визуально произвести дополнительный контроль корректности задания данных.

Удаление всей информации, введенной в режиме задания расчетных сочетаний усилий, выполняется кнопкой **Удаление РСУ** (это соответствует отказу от вычисления РСУ).

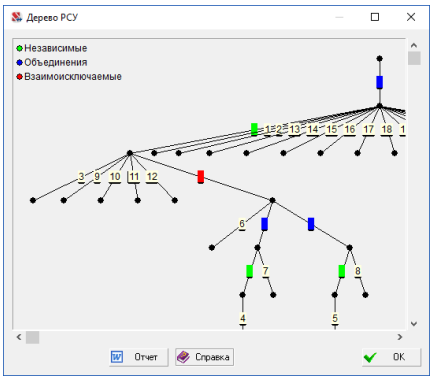



Рис. 18.7-11. *Диалоговое окно* **Дерево РСУ**

## 18.8. Расчетные сочетания перемещений

Программа **SCAD** позволяет вычислить расчетные сочетания перемещений (РСП). Вычисление РСП выполняется автоматически в процессе общего расчета.

Нормы проектирования регламентируют ограничения нормативных значений перемещений, поэтому для каждого узла вычисляются только нормативные, нормативные длительные и нормативные временные сочетания перемещений.

## 18.9. Расчетные сочетания реакций в связях

Если при выполнении расчета была активна опция **Вычислять реакции в связях**, то в процессе выбора расчетных сочетаний усилий будут сформированы и расчетные сочетания реакций в связях.

В некоторых случаях (например, при проверке конструкций на устойчивость положения против опрокидывания) нормы проектирования требуют использовать постоянные нагрузки с коэффициентом 0.9. Для расчетных сочетаний усилий это может быть сделано, используя группы РСУ. Для поиска соответствующих невыгодных сочетаний реакций в связях предусмотрен маркер **Создавать "анкерные" комбинации РСР**.

## 18.10. Расчетные сочетания прогибов

Расчетные сочетания прогибов вычисляются для стержневых элементов одновременно с РСУ. Сочетания прогибов, как и РСУ, будут сформированы для каждого сечения элемента.

## 18.11. Расчетные сочетания прогрессирующего обрушения

При расчете на прогрессирующее обрушение в качестве невыгодного сочетания загружений используется заданная пользователем комбинация. Фактически "выбор" расчетных сочетаний в этой ситуации сходится к вычислению расчетных и расчетных длительных сочетаний усилий для вышеупомянутой комбинации.

## 18.12. Анализ результатов (Постпроцессор РСУ и РСП)

Постпроцессор РСУ и РСП позволяет произвести анализ результатов расчета РСУ и РСП. Управление этим постпроцессором производится с помощью специальной инструментальной панели (рис. 18.12-1).

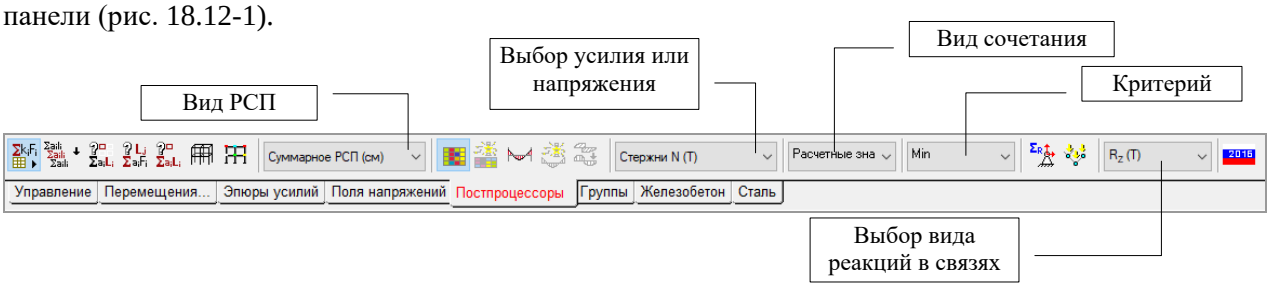



Рис. 18.12-1. *Инструментальная панель* **РСУ и РСП**

Инструментальная панель включает следующие операции:

 — создание комбинаций загружений по РСУ;

 — показать элементы, в РСУ которых вошли заданные загружения;

 — показать сочетания, в которые вошло заданное загружение;

 — показать элементы, в РСУ которых вошли заданные комбинации загружений;

 — цветовая индикация РСП;

 — цветовая индикация РСУ;

 — цветовая индикация РСУ при расчете на прогрессирующее обрушение;

 — расчетные сочетания реакций в связях (цветовая индикация);

 — расчетные сочетания реакций в связях;

 — огибающие эпюры расчетных сочетаний усилий;

 — огибающие эпюры расчетных сочетаний усилий (прогрессирующее обрушение);

 — смена оси отображения эпюр N и $M_k$;

 — отображение расчетной схемы.

### Создание комбинаций загружений по РСУ



Данная операция предназначена для получения всех комбинаций загружений, которые возникли при вычислении РСУ. Нажатие кнопки  приводит к появлению диалогового окна (рис. 18.12-2), в котором можно сузить выбор анализируемых сочетаний (например, выбрать только расчетные). Если в схеме есть отмеченные элементы, то можно взвести соответствующий маркер и программа будет анализировать только отмеченные элементы. Можно также, нажав кнопку **Элементы**, задать список интересующих элементов или выбрать элементы из нужных групп (рис. 18.12-3).

После нажатия кнопки **OK** будет выведен текстовый файл (рис. 18.12-4) с формулами комбинаций (наличие или отсутствие в этом файле номеров элементов зависит от состояния маркера **Печатать номера элементов**).

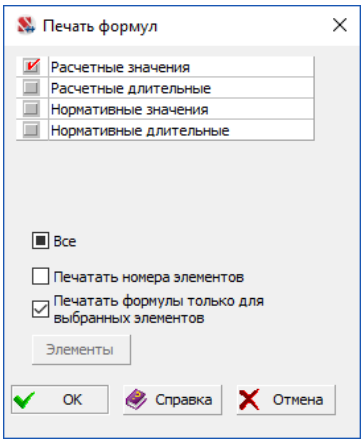



Рис. 18.12-2. *Диалоговое окно* **Печать формул**

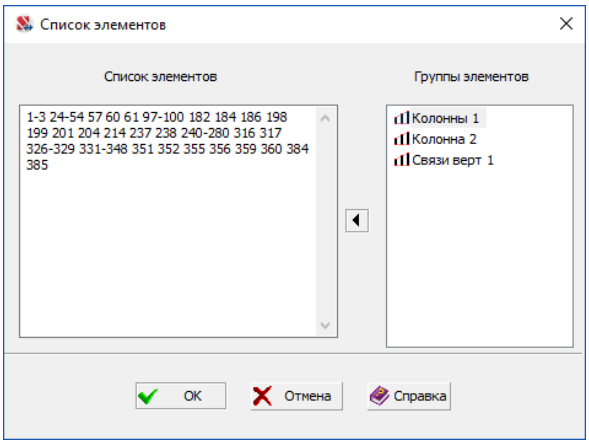



Рис. 18.12-3. *Диалоговое окно* **Список элементов**

1. L1+L2+L7 : 198-230 357 358
2. L1+L2+L3+0.89999*L4-L7 : 198-230
3. L1+L2+L6 : 198 203-205 210 211 214 215 218 227-230 357 358
4. L1+L2+L3+L4-0.89999*L7 : 198-205 207-210 212-217 219-223 225 226 229 230 357 358
5. L1+L2+L7+0.89999*L8-0.89999*L10 : 198 202-205 212-215 223 230
6. L1+L2+L3+0.89999*L4-L7+0.69999*L9-0.69999*L11 : 198 203-205 212-215 226
7. L1+L2+L7+0.89999*L16 : 198 200 201 203 207 208 210-213 216 224-226 228 358
8. L1+L2+L3+0.89999*L4-L7+0.69999*L8+0.69999*L12 : 198 20

Рис. 18.12-4. *Текстовый файл с формулами сочетаний*

Используя, расположенную рядом с кнопкой  стрелку дополнительных возможностей, можно вызвать меню и выбрать в нем еще два возможных варианта действий: создание отчетного файла в RTF-формате, который совместим с текстовыми процессорами типа MS Word или создание двоичного файла (с расширением **rsu2comb**), который может быть в дальнейшем импортирован при задании исходных данных для комбинаций загружений (см. главу 17).

## Показать элементы, в РСУ которых вошли заданные загружения



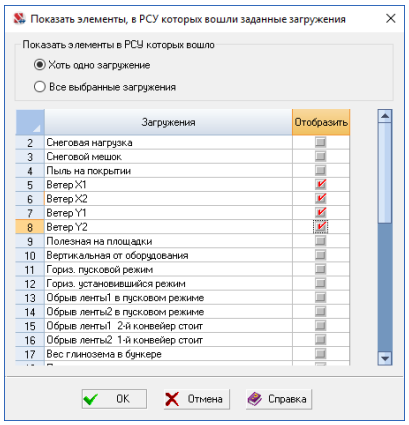



Рис. 18.12-5. *Выбор загружений*

Активация данной операции приводит к появлению диалогового окна (рис. 18.12-5), в котором перечислены все загружения (за исключением тех, которые в исходных данных РСУ имеют статус *неактивные*). После отметки нужных загружений и нажатия кнопки **OK** все элементы, в РСУ которых есть отмеченные загружения, становятся выбранными (и окрашенными в красный цвет). Очевидно, что если отметить строки, загружения в которых имеют тип «постоянные» и «длительные», то на схеме будут селектированы все элементы.

## Показать сочетания, в которые вошло заданное загружение



Активация данной операции приводит к появлению диалогового окна (рис. 18.12-6), в котором перечислены все загружения (за исключением тех, которые в исходных данных РСУ имеют статус *неактивные*). Выбрав нужное загружение можно получить в соседнем списке набор формул тех сочетаний, в которое оно (загружение) вошло. Из расположенного в верхней части диалога выпадающего списка можно выбрать только интересующие сочетания (все, только расчетные, ...).

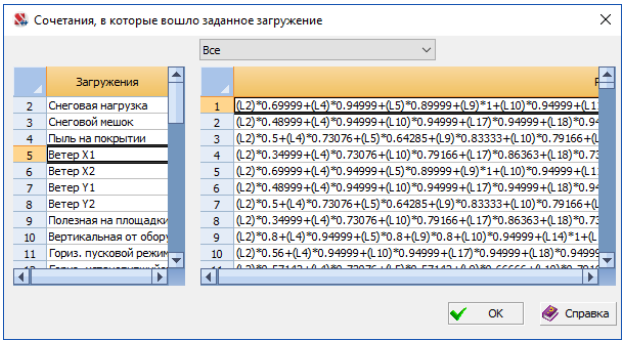



Рис. 18.12-6. *Диалоговое окно* **Сочетания, в которые вошло заданное загружение**

## Показать элементы, в РСУ которых вошли заданные комбинации загружений



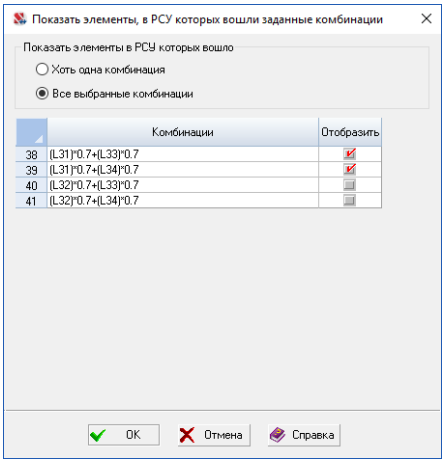



Рис. 18.12-7. *Выбор сочетаний*

Активация данной операции приводит к появлению диалогового окна (рис. 18.12-7), в котором перечислены все комбинации загружений (за исключением тех, которые в исходных данных РСУ имеют статус *неактивные*). После отметки нужных комбинаций и нажатия кнопки **OK** все элементы, в РСУ которых есть отмеченные комбинации, становятся выбранными (и окрашенными в красный цвет).

## Цветовая индикация РСУ



При графическом анализе результатов в постпроцессоре можно получить цветовую индикацию величин РСУ. Для этого необходимо выполнить следующие действия:

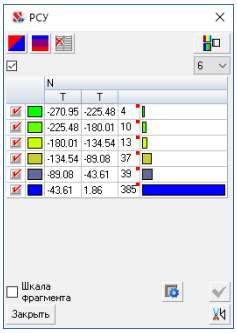



Рис. 18.12-8. *Цветовая шкала РСУ*

- из списка **Выбор вида усилия/напряжения** в инструментальной панели выбрать нужный вид;
- из списка **Тип комбинации** выбрать вид анализируемого сочетания (расчетное, нормативное, ...);
- из одноименного списка выбрать критерий (Min/Max/Max Abs).

После назначения указанных выше параметров будут построены цветовые шкалы (рис. 18.12-8) путем выбора для каждого элемента из всех сочетаний минимальных, максимальных или максимальных по абсолютной величине значений силового фактора (в случае стержней это будет сделано по всем сечениям).

## Цветовая индикация РСП



Аналогично РСУ можно получить цветовую индикацию для расчетных сочетаний перемещений.

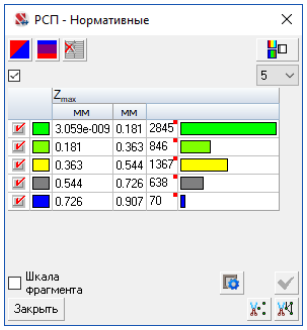



Рис. 18.12-9. *Цветовая шкала РСП*

Для этого в инструментальной панели следует из списка **Вид расчетных сочетаний перемещений** выбрать нужный критерий (например, максимальное суммарное перемещение) и активировать операцию.

Для цветовой индикации РСП используются маркеры в узлах расчетной схемы и цветовая шкала (рис. 18.12-9).

## Цветовая индикация РСУ (прогрессирующее обрушение)



Отображение результатов расчета РСУ при анализе прогрессирующего обрушения позволяет получить цветовую индикацию расчетных сочетаний по тем же правилам, что и обычные сочетания (см. выше).

## Огибающие эпюры РСУ



Эта операция выполняет построение огибающих эпюр на основе расчетных сочетаний усилий. При этом, для каждого сечения стержневых элементов по критерию минимума или максимума выбирается значение указанного силового фактора из комбинаций заданного типа.

Для выполнения операции следует выбрать из соответствующих списков в инструментальной панели критерий, силовой фактор и тип комбинации и активировать операцию кнопкой  .

## Огибающие эпюры РСУ (прогрессирующее обрушение)



Эта операция аналогична предыдущей и доступна при анализе РСУ для расчетов на прогрессирующее обрушение.

## Расчетные сочетания реакций в связях



Цветовая индикация расчетных сочетаний реакций в связях может быть получена при условии, что, во-первых, при выполнении расчета задачи был активен маркер **Реакции в связях**, во-вторых, подготовлены исходные данные для формирования расчетных сочетаний усилий и, в-третьих, расчетные сочетания реакций в связях вычислены.

Реакции отображаются в виде цветовых маркеров в узлах со связями по анализируемому направлению реакций. Для отображения реакций надо выполнить следующие действия:

- из списка **Выбор вида усилия/напряжения** в инструментальной панели выбрать нужный вид;
- из списка **Тип комбинации** выбрать вид анализируемого сочетания (расчетное, нормативное, ...);
- из одноименного списка выбрать критерий (Min/Max/Max Abs).

Расчетные сочетания реакций могут также отображаться стрелками —  (аналогично узловым нагрузкам).

## Информация об элементе/узле

Для каждого конечного элемента или узла, используя инструменты операций **Информация об элементе**  и **Информация об узле**  можно получить табличное представление РСУ и РСУ (прогрессирующее обрушение) для элементов, а также расчетные сочетания перемещений в узле и расчетные сочетания реакций в связях.

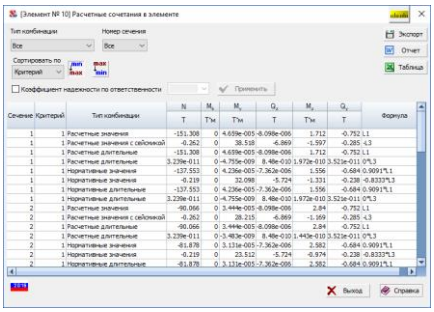


Рис. 18.12-10. *Диалоговое окно* **Расчетные сочетания в элементе**

В окне с РСУ элемента (рис. 18.12-10) предусмотрена возможность сортировки данных по тому или иному признаку, отображение только указанных типов сочетаний (расчетные, нормативные, ...), вывод информации в отчетный документ или электронную таблицу. Для стержневых элементов в списке **Номер сечения** можно выбрать или все сечения, или любое одно (в зависимости от заданного количества сечений вычисления усилий). Кнопка **Экспорт** позволяет сохранить в файле с расширением **.rsu2** значения расчетных сочетаний усилий для передачи их в режим **Сопротивление сечений** программ **Кристалл**, **АРБАТ** или **Декор**.

В окне **Расчетные сочетания в элементе** при отмеченном маркере **Коэффициент надежности по ответственности** обеспечена возможность ввода числового значения данного коэффициента. В том случае, когда отмеченный конечный элемент принадлежит некоторому конструктивному элементу или группе конструктивных элементов, значение по умолчанию для коэффициента надежности по ответственности будет взято из данных о соответствующем конструктивном элементе. В случае, когда рассматриваемый конечный элемент не принадлежит ни одному конструктивному элементу, значение по умолчанию для коэффициента надежности по ответственности будет принято равным 1.

В зависимости от выбранных норм по надежности коэффициент надежности по ответственности будет применен либо только к расчетным, либо к расчетным и нормативным величинам усилий/напряжений.

После нажатия кнопок Отчет или Таблица данные РСУ будут экспортированы соответственно в документ Word (тип файла *.doc) или таблицу Excel (тип файла *.xls) с учетом введенного (определенного) значения коэффициента надежности по ответственности. Это может понадобиться в том случае, когда формируются данные, например, для таблицы «Ведомости элементов» чертежей стадии КМ.

При нажатии кнопки Экспорт данные РСУ экспортируются в файл типа *.rsu2 без учета коэффициента надежности по ответственности, поскольку в тех программах, в которых предусмотрен импорт файлов *.rsu2, данный коэффициент задается отдельно.

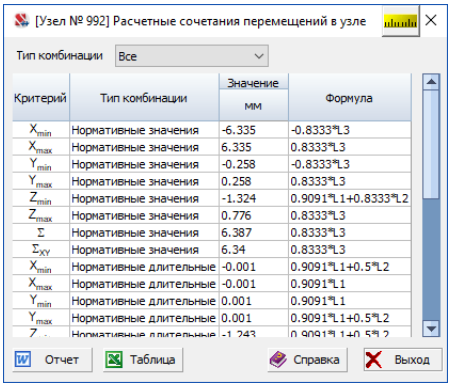



Рис. 18.12-11. *Диалоговое окно* **Расчетные сочетания перемещений в узле**

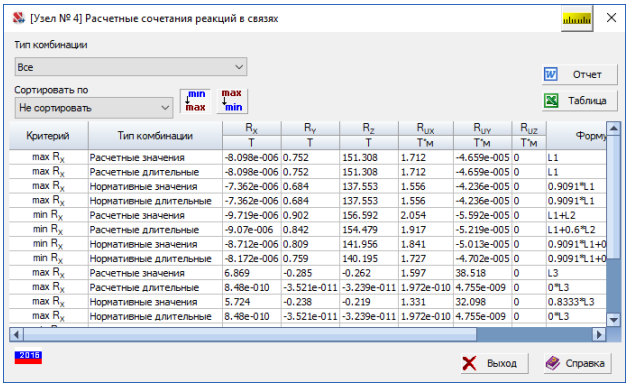



Рис. 18.12-12. *Диалоговое окно* **Расчетные сочетания реакций в связях**

Расчетные сочетания перемещений (рис. 18.12-11) и реакций в связях (рис. 18.12-12) в выбранном узле также можно получить в табличном виде, используя кнопки РСП и РСР соответственно в диалоговом окне **Информация об узле** (рис. 18.12-15).

Таблицы с результатами могут быть сформированы с помощью **Генератора таблиц в текстовом формате** или **Документатора** (см. главу 13).

Кнопка активизирует диалоговое окно, в котором приведены имена загружений.

# 19. Армирование сечений железобетонных элементов

В этом режиме выполняется подбор арматуры и экспертиза заданного армирования в элементах железобетонных конструкций по предельным состояниям первой и второй групп в соответствии с требованиями СНиП 2.03.01-84* «Бетонные и железобетонные конструкции», КМК 2.03.01-96, СНиП 52-01-2003 (СП 52-101-2003) или СП 63.13330.

Расчет производится для железобетонных конструкций, выполняемых из тяжелого, мелкозернистого и легкого бетонов с применением арматурной стали или арматурной проволки.

Библиотека процедур подбора арматуры содержит следующие модули:

- **Стержень 2D** — для армирования плоских стержневых железобетонных элементов прямоугольного, таврового, двутаврового и кольцевого сечений по предельным состояниям первой и второй групп;
- **Стержень 3D** — для армирования пространственных стержневых железобетонных элементов прямоугольного, таврового, двутаврового и кольцевого сечений по предельному состоянию первой (по СНиП 2.03.01-84*, КМК 2.03.01-96) и по предельным состояниям первой и второй групп (по СП 52-101-2003 или СП 63.13330);
- **Плита** — для армирования элементов плит по предельным состояниям первой и второй групп;
- **Оболочка** — для армирования элементов оболочек по предельным состояниям первой и второй групп;
- **Балка-стенка —** для армирования элементов балок-стенок по предельным состояниям первой и второй групп.

Исходными данными для работы постпроцессора являются:

- геометрия армируемого сечения;
- расчетные сочетания усилий (РСУ);
- информация о классе бетона, классе арматуры, расстояние до центра тяжести арматуры и т. п.

Экспертиза и подбор арматуры в стержневых элементах выполняется в соответствии с методикой, изложенной в выбранных нормах. Так как в нормах (за исключением СП 63.13330) не оговорена процедура проверки арматуры в элементах оболочек, плит и т. п., то в комплексе **SCAD** для этого использована методика, предложенная Н.И. Карпенко [3]. На данной методике основаны и рекомендации СП 63.13330. Основные положения этой методики приведены в разделе 19.16. Следует отметить, что они соответствуют общим положениям расчета плоскостных конструкций, приведенным в п. 1.38 СНиП 2.03.01-84*. Бетонные и железобетонные конструкции.

Кроме того, в СП 63.13330, в отличие от СП 52-101-03 (точнее, Пособия к этому СП), не оговорено условие образования наклонных трещин. В программе все же выполняется такая проверка при условии, что установлено требование отсутствия трещин. Расчет реализован в соответствии с рекомендациями п. 4.28 Пособия к СП 52-101-03.

## Определение основных терминов

**Площадь арматурного стержня ($a_1$, $a_2$, $a_3$, $a_4$, $aw_x$, $aw_y$)** – площадь одного арматурного стержня соответствующего вида, вычисленная как геометрическая площадь круга диаметром $d_i$ по формуле (см$^2$):

$$a_i = \frac{\pi d_i^2}{4}; i = 1,2,3,4;$$

$$aw_{x(y)} = \frac{\pi d_{x(y)}^2}{4}.$$

## Армирование двумерных элементов

Для плит, оболочек и балок-стенок вводится понятие интенсивности армирования.

**Интенсивность продольного армирования (*IS*$_1$, *IS*$_2$, *IS*$_3$, *IS*$_4$)** – величина, характеризующая площадь арматуры определенного вида ($S_1$, $S_2$, $S_3$, $S_4$), которая приходится на единицу длины зоны армирования в направлении, перпендикулярном направлению раскладки стержней арматуры. Интенсивность численно равна площади сечения одного арматурного стержня, деленной на шаг раскладки данного вида арматуры (см$^2$/м):

$$IS_i = \frac{a_i}{s}, \quad \begin{cases} s = s_x (i = 3,4), \\ s = s_y (i = 1,2). \end{cases}$$

**Интенсивность поперечного армирования (погонная)**[1] (***W*$_x$, *W*$_y$**) – площадь поперечной арматуры, приходящаяся на единицу длины зоны поперечного армирования[2] в направлении соответствующей оси, и численно равная площади одного арматурного стержня, деленной на шаг раскладки данного вида арматуры (см$^2$/м).

Результатом работы операции подбора арматуры, реализованной в ПК **SCAD**, являются значения интенсивности армирования (см$^2$/м) для каждого вида арматуры, обеспечивающие выполнение требований нормативного документа, в соответствие с которыми выполнялся расчет:

$$W_{x(y)} = a_w / s_{x(y)},$$

где $s$ – шаг раскладки поперечной арматуры, $a_w$ – площадь сечения стержня поперечной арматуры.

**Интенсивность поперечного армирования (*W*)** – площадь поперечной арматуры, приходящаяся на единицу площади зоны поперечного армирования, и численно равная площади одного арматурного стержня, деленной на шаги раскладки поперечной арматуры (см$^2$/м$^2$).

$$W = \frac{a_w}{s_x s_y}.$$

**Площадь поперечной арматуры (*AW*$_x$, *AW*$_y$)** – произведение интенсивности армирования на шаг раскладки арматуры в ортогональном направлении (см$^2$):

$$AW_{x(y)} = W_{x(y)} s_{y(x)}.$$

## Армирование стержневых элементов

**Площадь продольной арматуры (*AS*$_1$, *AS*$_2$, *AS*$_3$, *AS*$_4$)** – суммарная площадь арматурных стержней, расположенных вдоль продольной оси стержня возле определенных граней сечения элемента (см$^2$).

$$AS_i = \sum_{k=1}^{M_i} a_k; \quad i = 1, 2, 3, 4,$$

где $M_i$ — количество арматурных стержней $i$-го вида.

**Площадь поперечной арматуры (*AW*$_y$, *AW*$_z$)** – суммарная площадь (см$^2$) арматурных стержней в сечении элемента, расположенных параллельно определенным граням сечения (для хомутов — количество срезов, то есть число пересечений хомутов с плоскостью, проходящей через продольную ось стержня).

$$AW_{z(y)} = \sum_{k=1}^{M_{1(2)}} W_{z(y)k}.$$

**Интенсивность поперечного армирования (*W*$_y$, *W*$_z$)** – площадь поперечной арматуры, приходящаяся на единицу длины зоны поперечного армирования в направлении, параллельном

[1] Экспертиза и подбор поперечной арматуры в пластинчатых элементах в SCAD основаны на рекомендациях СНиП по расчету поперечной арматуры для изгибаемого элемента прямоугольного сечения (программа рассматривает полосу шириной 1 м и высотой равной толщине пластины). Поэтому мы используем термин ***погонная*** интенсивность. При выборе конструктивного решения на основании результатов подбора шаги поперечной арматуры не должны превышать 1 м, чтобы обеспечить соответствие с используемым подходом к расчету (тем более, что гораздо более жесткое ограничение оговорено в конструктивных требованиях СНиП). Везде в программе для величин $IW_x$, $IW_y$ используется размерность типа см$^2$/мм, хотя более точно следовало бы писать $\frac{\text{см}^2}{\text{мм} \times \text{погонный метр}}$.

[2] Зона поперечного армирования для $Q_x$ простирается вдоль оси $Y_1$, а для $Q_y$ — вдоль оси $X_1$.

соответствующей грани, и численно равная суммарной площади поперечной арматуры $AW_{z(y)}$, лежащей в сечении стержня параллельно соответствующей грани, деленной на шаг раскладки данного вида арматуры (см$^2$/м).

$$W_{z(y)} = AW_{z(y)} / s_{z(y)}.$$

Исходные данные задаются в диалоговом окне постпроцессора. Результатом работы постпроцессора являются площади «размазанной» арматуры, а также количество, площадь сечения и диаметры арматурных стержней. Результаты могут быть представлены в виде таблиц и графических материалов, выводиться на экран или печать.

## 19.1. Ограничения реализации

При использовании постпроцессора следует учитывать некоторые ограничения реализации:

- не реализован расчет элементов из ячеистого, поризованного и напрягающего бетонов;
- не выполняется расчет предварительно напряженных железобетонных элементов;
- не выполняется расчет элементов по предельному состоянию по деформациям;
- набор сечений ограничен прямоугольником, тавром, двутавром, кольцевым и круглым сечением;
- не контролируется ограничение на диаметр арматуры при бетонах низких марок (максимальный диаметр арматуры задается пользователем);
- не контролируется предельная ширина полок таврового и двутаврового сечений (расчетная ширина полок задается пользователем в соответствии с требованиями норм, например, п. 3.16 СНиП 2.03.01-84*, КМК 2.03.01-96);
- не учитывается коэффициент $\gamma_{s5}$ для высокопрочной арматуры классов A-IV, A-V, A-VI, B-II, BP- II, K7, K-19 при напряжениях выше условного предела текучести (табл. 24 СНиП 2.03.01-84*);
- не производится расчет по закрытию трещин при проверке по второму предельному состоянию;
- не выполняется расчет на выносливость;
- методика СНиП анализа прочности по наклонным сечениям ориентирована на работу с эпюрой поперечных сил, используя которую можно получить “поперечную силу в наклонном сечении с длиной проекции С на продольную ось элемента, определяемую от всех внешних сил, расположенных по одну сторону от рассматриваемого наклонного сечения”. Это легко сделать в случае одного нагружения. Но при многих вариантах нагружения мы имеем их огибающую, которая не является равнодействующей всех внешних сил. Как поступать в этом случае, нормы не говорят. Поэтому в запас надежности используются значения поперечных сил в расчетных сечениях;
- фактически расчет круглого и кольцевого сечений на действие поперечной силы в нормах не оговорен. При формальном анализе формул СНиП сразу видно, что нужны две величины $b$ и $h_0$. Величина $h_0$ в нормах четко определена, а что такое ширина сечения – неясно. В **SCAD** расчет производится следующим образом. Везде, где при расчете на действие поперечной силы требуется величина $b \times h_0$, используется величина, равная площади сечения, имеющего внешний радиус $R$-$a$, где $R$ – внешний радиус рассматриваемого сечения, $a$ – расстояние до центра тяжести арматуры;
- не производится подбор продольной арматуры для обеспечения ограничений по гибкости;
- при экспертизе заданного армирования не производится проверка ограничений по гибкости.

## 19.2. Выбор норм проектирования



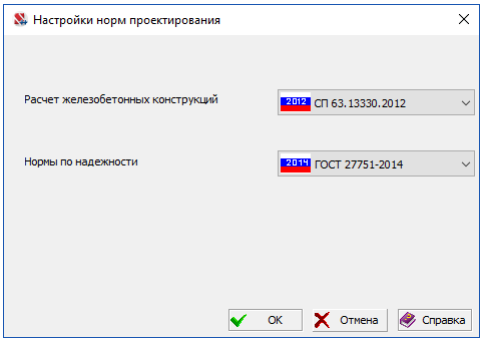




Рис. 19.2-1. *Диалоговое окно* **Настройки норм проектирования**

Операция позволяет изменить нормы проектирования железобетонных конструкций и нормы надежности. В диалоговом окне (рис. 19.2-1) из выпадающих списков следует выбрать нужные нормы и нажать кнопку **OK**. При смене норм следует помнить, что нормы, по которым выбирались расчетные сочетания усилий, и нормы проектирования должны корреспондироваться.

## 19.3. Общие сведения о модулях армирования

### Стержень 2D (одноосное напряженное состояние)

Предназначен для экспертизы и подбора арматуры в сечениях стержневых железобетонных элементов по предельным состояниям первой и второй групп (прочность и трещиностойкость). Модуль рассчитывает стержни прямоугольного, таврового, двутаврового и кольцевого сечений на **изгиб и внецентренное сжатие (растяжение) с кручением**. В сечении могут действовать такие силовые факторы:

- продольная сила — $N$;
- крутящий момент — $M_k$;
- перерезывающая сила — $Q_z$;
- изгибающий момент — $M_y$.

Результатом работы модуля являются площади симметричной и несимметричной продольной арматуры, площадь и шаг поперечной арматуры, а также соответствующий им набор арматурных стержней.

На рис. 19.3-1,*а–г* для различных типов сечений приведено расположение и идентификация несимметричной, а на рис. 19.3-1,*д–з* — симметричной продольной арматуры. Естественно, что симметричная арматура может быть подобрана только для сечений симметричных относительно оси $Y_1$.

Более подробно схема расположения поперечной арматуры для сечений различного типа приведена в разделе 19.13.

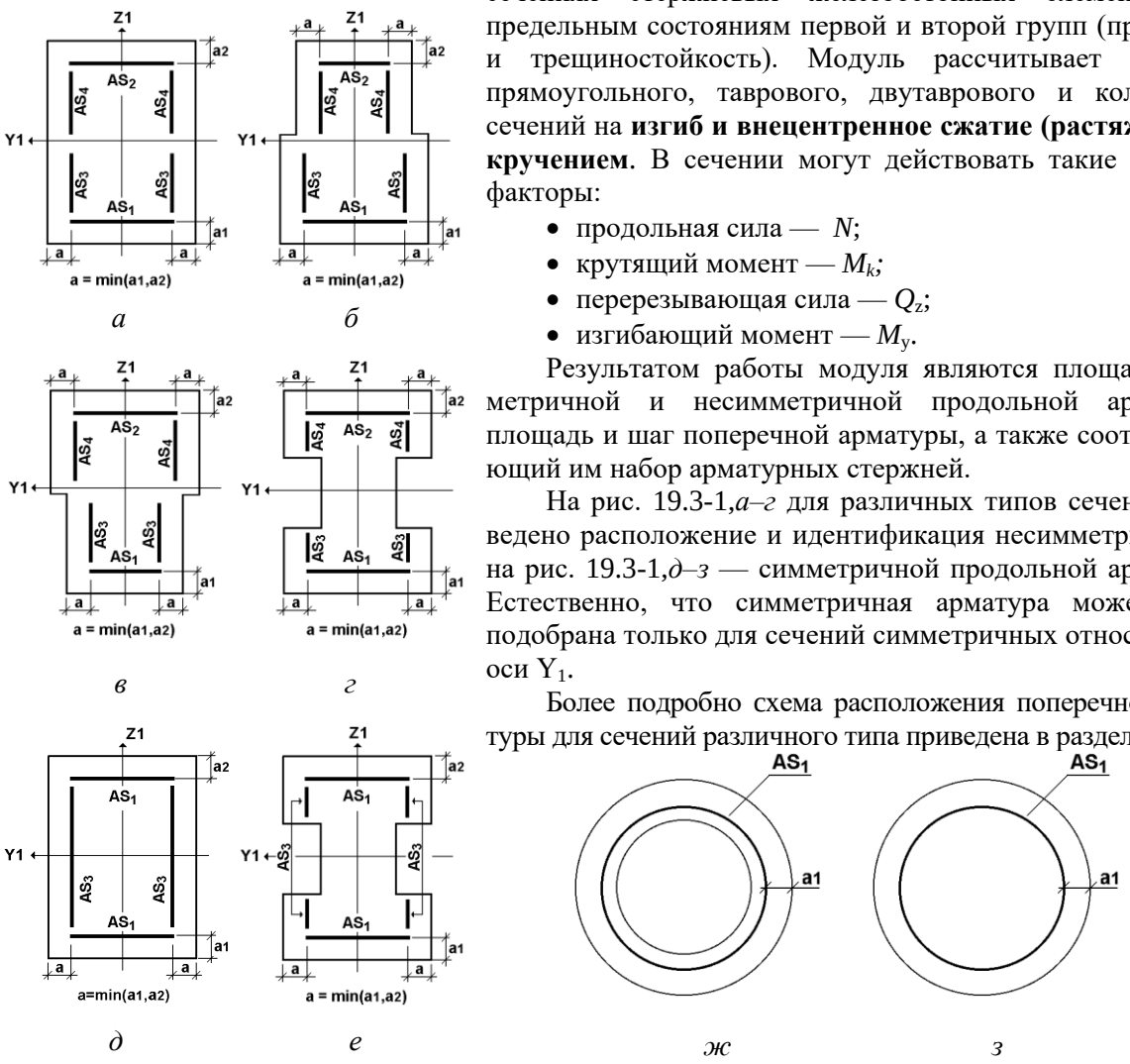
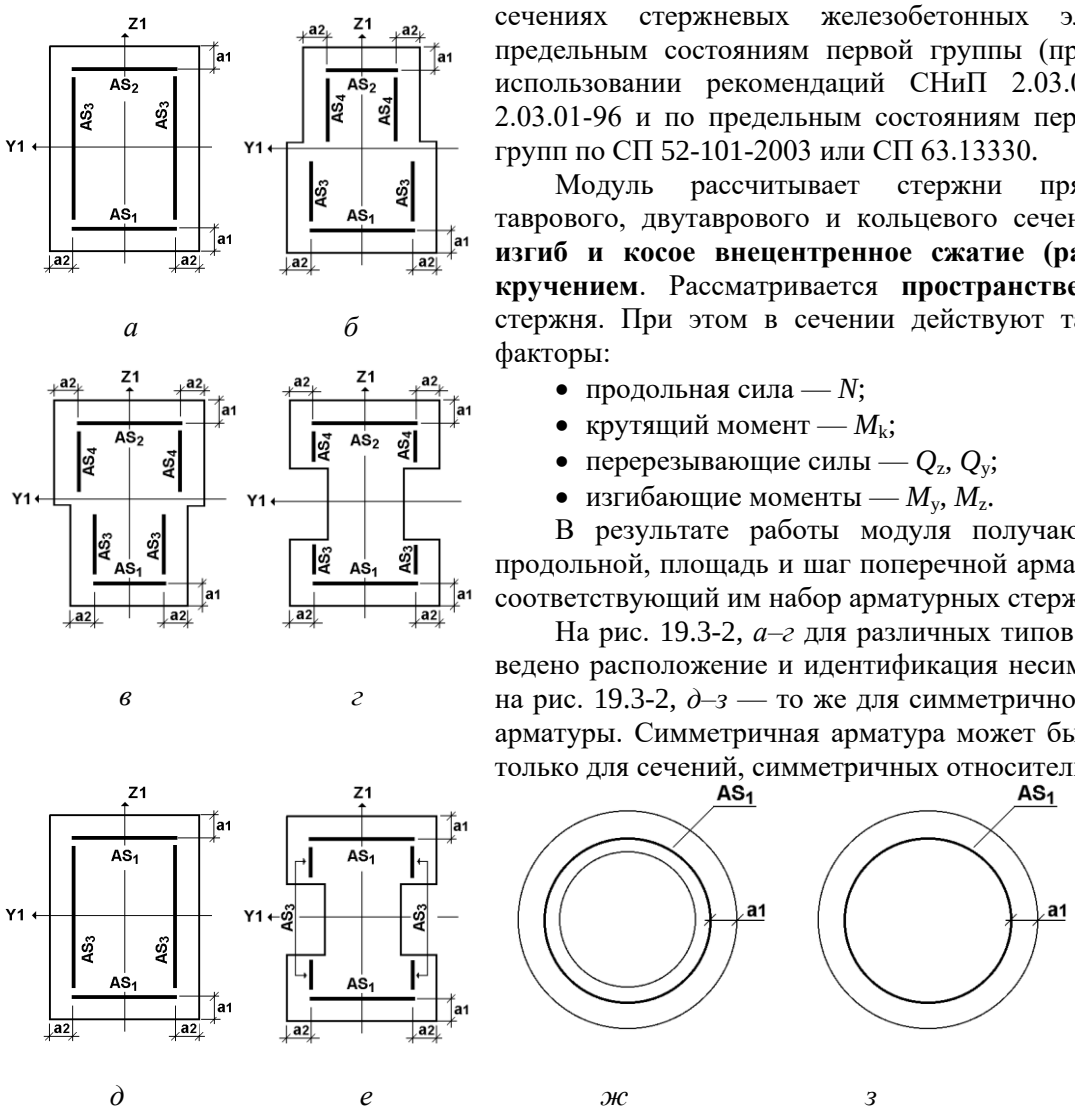



Рис. 19.3-1. *Виды сечений с несимметричным (а–г) и симметричным (д–з) расположением продольной арматуры для изгибаемых элементов*

## Стержень 3D (двухосное напряженное состояние)




Предназначен для экспертизы и подбора арматуры в сечениях стержневых железобетонных элементов по предельным состояниям первой группы (прочность) при использовании рекомендаций СНиП 2.03.01-84*, КМК 2.03.01-96 и по предельным состояниям первой и второй групп по СП 52-101-2003 или СП 63.13330.

Модуль рассчитывает стержни прямоугольного, таврового, двутаврового и кольцевого сечений на **косой изгиб и косое внецентренное сжатие (растяжение) с кручением**. Рассматривается **пространственная** работа стержня. При этом в сечении действуют такие силовые факторы:

- продольная сила — $N$;
- крутящий момент — $M_k$;
- перерезывающие силы — $Q_z$, $Q_y$;
- изгибающие моменты — $M_y$, $M_z$.

В результате работы модуля получаются площадь продольной, площадь и шаг поперечной арматуры, а также соответствующий им набор арматурных стержней.

На рис. 19.3-2, *а–г* для различных типов сечений приведено расположение и идентификация несимметричной, а на рис. 19.3-2, *д–з* — то же для симметричной продольной арматуры. Симметричная арматура может быть подобрана только для сечений, симметричных относительно оси $Y_1$.

Рис. 19.3-2. *Виды сечений с несимметричным (а–г) и симметричным (д–з) расположением продольной арматуры для сжато-изогнутых элементов*

## Плита. Оболочка

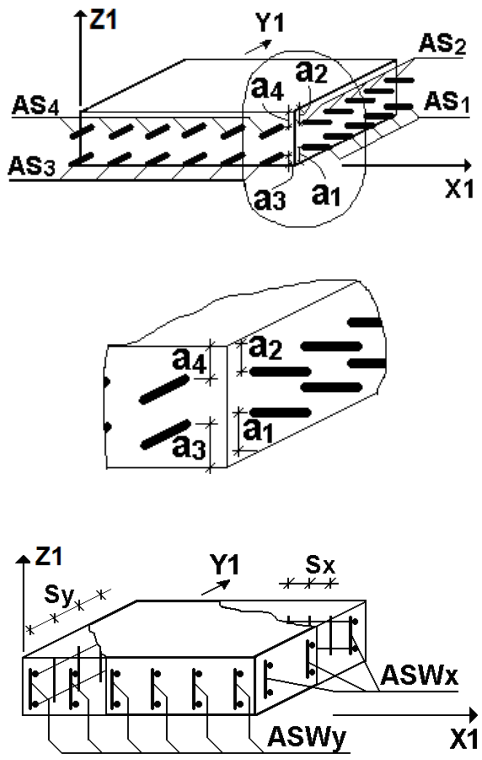



Рис. 19.3-3. *Армирование элементов железобетонной оболочки*

Предназначен для экспертизы и подбора арматуры железобетонных плит и оболочек по предельным состояниям первой и второй групп (прочность и трещиностойкость).

***Плита***

Подбор выполняется с учетом следующих силовых факторов, вычисленных в центре элемента:

- крутящий момент — $M_{xy}$;
- перерезывающие силы — $Q_x$, $Q_y$;
- изгибающие моменты — $M_x$, $M_y$.

***Оболочка***

Подбор выполняется с учетом следующих силовых факторов, вычисленных в центре элемента:

- нормальные напряжения — $N_x$, $N_y$ (только в оболочках);
- касательные напряжения — $T_{xy}$ (только в оболочках);
- крутящий момент — $M_{xy}$;
- перерезывающие силы — $Q_x$, $Q_y$;
- изгибающие моменты — $M_x$, $M_y$.

В результате работы модуля вычисляются площади верхней и нижней продольной арматуры, а также площади и шаги поперечной арматуры. На рис. 19.3-3 для сечений элемента железобетонной оболочки приведено расположение и идентификация верхней и нижней продольной арматуры, а также поперечной арматуры.

Обратите внимание, что расстояние до центра тяжести арматуры может задаваться как двумя, так и четырьмя числами. В первом случае значение **$a_1$** соответствует расстоянию до центра тяжести нижней арматурной сетки, а **$a_2$** — верхней арматурной сетки. Во втором случае **$a_1$** и **$a_2$** задаются для арматуры, расположенной соответственно снизу и сверху вдоль оси $X_1$, а **$a_3$** и **$a_4$** — для арматуры вдоль оси $Y_1$.

## Балка-стенка

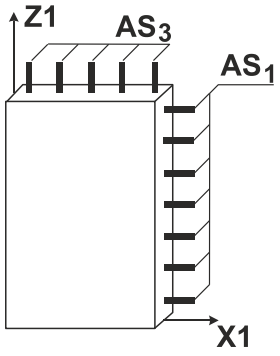



Рис. 19.3-4. *Армирование элементов балки-стенки*

Предназначен для экспертизы и подбора арматуры железобетонных балок-стенок (плоское напряженное состояние) по предельным состояниям первой и второй групп (прочность и трещиностойкость). Модуль рассчитывает элемент железобетонной балки-стенки на действие таких силовых факторов, вычисленных в центре элемента:

- нормальные напряжения — $N_x$, $N_z$;
- касательные напряжения — $T_{xz}$.

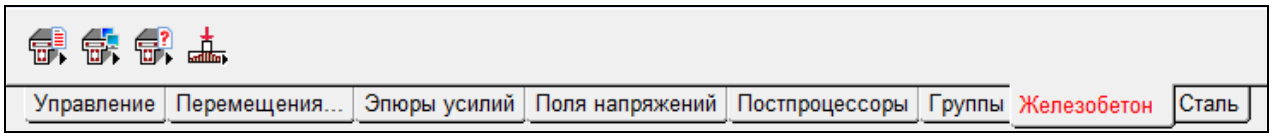
В результате работы модуля вычисляются площади арматуры, работающей в сечениях, ортогональных к локальным осям местной системы координат $X_1$ и $Z_1$. На рис. 19.3-4 для сечений элемента железобетонной балки-стенки показано расположение и идентификация подбираемой арматуры.



**Перед тем, как выполнять подбор арматуры в элементах плиты, оболочки или балки-стенки, необходимо убедиться в том, что усилия в армируемых элементах получены в нужных направлениях. В противном случае следует с помощью операции изменения направления выдачи усилий (см. главу** «Задание характеристик узлов и элементов»**) задать необходимые направления и повторить расчет усилий и РСУ (в режиме *Продолжение расчета*).**

## 19.4. Работа с постпроцессором

Управление операциями ввода исходных данных, анализа несущей способности и подбора арматуры в элементах железобетонных конструкций выполняется из раздела инструментальной панели **Железобетон**. Элементы управления указанными операциями сосредоточены в следующих инструментальных панелях:




 — **Ввод данных**;

 — **Подбор арматуры**;

 — **Экспертиза железобетона**;

 — **Продавливание**.

Обязательным условием для работы — является наличие расчетных сочетаний усилий (РСУ). В противном случае функции анализа железобетонных конструкций будут недоступны. Следует обратить внимание на соответствие норм, заданных при формировании РСУ, и норм, использованных при анализе элементов железобетонных конструкций.

## 19.5. Конструктивные элементы и группы конструктивных элементов

Анализ несущей способности стержневых элементов железобетонных конструкций выполняется для **групп конструктивных элементов** (в такой группе каждый конечный элемент рассматривается как отдельный конструктивный элемент) и для **конструктивных элементов**, каждый из которых состоит из одного или нескольких конечных элементов. Конечный элемент может входить только в одну группу конструктивных элементов. Кроме того, все конечные элементы, входящие в группу, получат одинаковые коэффициенты расчетной длины.

При формировании ***групп конструктивных элементов*** следует помнить, что все стержневые элементы, входящие в группу, должны иметь одинаковый тип сечения (размеры сечения могут быть разными) и одинаковый тип конечных элементов. Кроме того, корректным является совпадение длин элементов, входящих в одну группу, хотя программа этот параметр не проверяет.

***Конструктивный элемент*** моделирует физически однородный элемент конструкции, например, стойку рамы, балку или ребро ребристой плиты перекрытия.

В тех случаях, когда правила работы будут касаться как конструктивных элементов, так и групп конструктивных элементов, вводится общее понятие «конструктивной группы».

**Геометрическая длина конструктивного элемента равна сумме длин гибкой части конечных элементов, его образующих.**

В качестве конструктивного элемента рассматривается непрерывная цепочка стержневых конечных элементов, обладающая следующими свойствами:

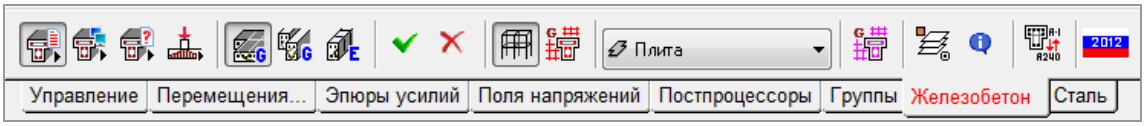
- элементы, входящие в цепочку, лежат на одной прямой;
- все элементы цепочки имеют одинаковый тип жесткости;
- все конечные элементы цепочки имеют одинаковый тип;
- у всех элементов цепочки одинаково ориентированы главные оси поперечного сечения;
- элементы цепочки, для которых не задан признак «Ребро плиты», не должны иметь жестких вставок и шарниров (шарниры и жесткие вставки допускаются только в начальном и конечном узле цепочки, при этом жесткие вставки должны располагаться только по направлению локальной оси $X_1$);

- элементы цепочки не могут входить в состав других конструктивных групп (в том числе и для расчета несущей способности элементов стальных конструкций), если этим конструктивным группам не присвоен признак «дополнительных».

Для пластинчатых элементов, входящих в группу конструктивных элементов, обязательным условием является одинаковый вид конечных элементов в группе с точки зрения их напряженно-деформированного состояния (оболочка, плита, балка-стенка). В качестве рекомендации можно рассматривать одинаковую ориентацию местных осей $Z_1$ и единые правила ориентации осей выдачи усилий. Указанные факторы программа не проверяет и за их корректное задание отвечает пользователь.

## 19.6. Ввод исходных данных

Инструментальная панель режима **Ввод данных** включает кнопки вызова следующих операций:




 — создание групп армирования пластин;

 — создание групп армирования стержней;

 — создание конструктивных элементов армирования стержней;

 — ввод данных и сохранение активной группы;

 — отказ (сброс текущего состояния);

 — возврат к отображению расчетной схемы;

 — селекция элементов активной группы;

 — режим визуализации активной группы;

 — управление конструктивными группами железобетонных элементов;

 — информация о группах армирования;

 — назначение класса бетона и арматуры;

 — выбор норм проектирования.

Кроме того, панель содержит выпадающий список для выбора конструктивной группы.

Конструктивные группы могут быть предварительно сформированы в разделе инструментальной панели **Группы** (операция **Элементы железобетонных конструкций** —  ). В этом случае, если не требуется их корректировать, режим ввода данных можно пропустить и сразу перейти к подбору арматуры. В противном случае создание и корректировка конструктивных групп выполняется в разделе **Ввод данных** инструментальной панели **Железобетон**.

### Формирование новых конструктивных групп

При подготовке новых конструктивных групп рекомендуется придерживаться следующего порядка работы:

- выбрать на схеме (отметить) элементы, входящие в конструктивную группу;
- в разделе **Железобетон** инструментальной панели выбрать операцию **Ввод данных** —  , после чего появится инструментальная панель подготовки исходных данных для анализа элементов железобетонных конструкций;
- нажать одну из кнопок, соответствующую типу создаваемой группы:

-  — **Создание групп армирования пластин**;
-  — **Создание групп армирования стержней**;
-  — **Создание конструктивных элементов армирования стержней**;

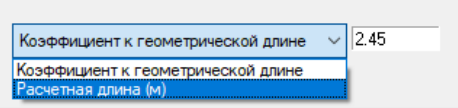
- нажать кнопку  — **Подтверждение**;
- в появившемся диалоговом окне **Армирование пластин** или **Армирование стержней** (в зависимости от типа элементов группы) задать имя группы, ввести или выбрать из списков необходимые данные, в том числе: значение коэффициента надежности по ответственности, класс арматуры, коэффициенты условий работы и максимально допустимые диаметры продольной и поперечной арматуры, класс бетона и другие;
- активировать маркер **Ребро плиты**, если стержневой конструктивный элемент рассматривается как ребро в составе ребристого перекрытия и имеет жесткие вставки в узлах входящих в него элементов;
- нажать кнопку **Добавить** и выйти из диалогового окна, нажав кнопку **Выход**.

## Диалоговые окна Армирование стержней и Армирование пластин

Многостраничные диалоговые окна **Армирование стержней** (рис. 19.6-1) и **Армирование пластин** (рис. 19.6-2) предназначены для задания данных для групп армирования.

Характеристики, которые задаются на странице **Общие параметры**, включают:

- **Коэффициент надежности по ответственности** — значение выбирается из выпадающего списка или задается пользователем;
- **Тип элемента** — для пластинчатых элементов это оболочка, балка-стенка или плита, а для стержневых элементов — изгибаемый или сжато-изогнутый (растянуто-изогнутый) элемент; при этом, для изгибаемого элемента, независимо от значения и знака продольной силы, она принимается равной нулю, даже если сила возникла при статическом и динамическом расчете. Аналогично, для элементов типа плита считаются равными нулю все напряжения $N_x$, $N_y$, $T_{xy}$, а для элементов типа балка-стенка — $M_x$, $M_y$, $M_{xy}$, $Q_x$, $Q_y$;
- **Коэффициенты расчетной длины** или **расчетные длины элементов** (для сжато-изогнутых стержневых элементов). В программе предусмотрено задание этой информации либо в виде коэффициента расчетной длины, либо в виде расчетной длины. Переключение способа ввода данных осуществляется с помощью выпадающего списка, который расположен рядом с полем ввода:




- **Напряженное состояние** — одноосный или косой изгиб; для случая одноосного напряженного состояния усилия $M_z$ и $Q_y$ полагаются равными нулю, за исключением кольцевого сечения, в котором расчет производится на действие момента $M = \sqrt{M_y^2 + M_z^2}$ и поперечной силы $Q = \sqrt{Q_y^2 + Q_z^2}$ ;

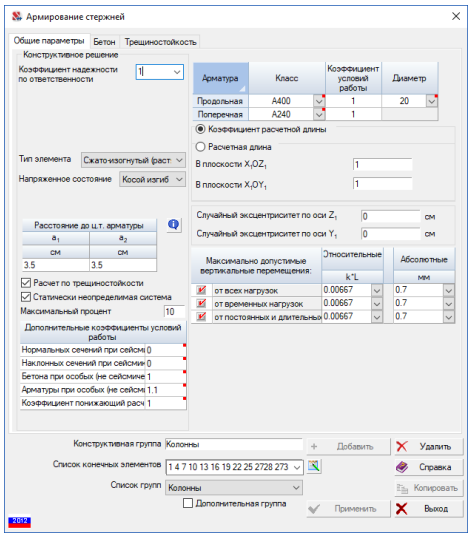



Рис. 19.6-1. *Страница* **Общие параметры** *диалогового окна* **Армирование стержней**

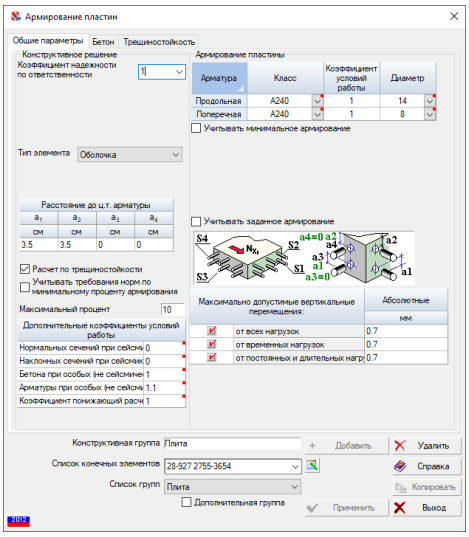



Рис. 19.6-2. *Страница* **Общие параметры** *диалогового окна* **Армирование пластин**

- Характеристики арматуры, которые включают **Класс** продольной и поперечной арматуры, **Коэффициенты условий работы** и максимально допустимый при подборе **Диаметр** продольной арматуры. В случае подбора арматуры с учетом трещиностойкости в графе **Диаметр** записываются диаметры продольной и поперечной арматуры, которые будут учтены при определении ширины раскрытия трещин;
- **Случайный эксцентриситет** (для сжато-изогнутых стержневых элементов) — если задаются нулевые значения, то величина эксцентриситета принимается автоматически согласно рекомендациям норм;
- **Расстояния до центра тяжести арматуры**;
- **Максимальный процент армирования**, превышение которого рассматривается, как признак невозможности подбора арматуры;
- **Расчет по трещиностойкости** — после активации этого маркера появляется страница **Трещиностойкость**, на которой назначается категория трещиностойкости и допустимая ширина кратковременного и длительного раскрытия трещин (диаметр арматуры, учитываемый при определении расстояния между трещинами, берется из таблицы на странице **Общие параметры**);

**Коэффициенты учета сейсмического воздействия для нормальных и наклонных сечений** (по умолчанию, если заданы нули, значения принимаются согласно соответствующим сейсмическим нормам); в этой же таблице (при расчете по СП 63.13330) можно ввести дополнительные коэффициенты условий работы бетона и арматуры (продольной и поперечной) для комбинаций, включающих особые воздействия (см. приложение Б к СП 296.1325800.2017 и Приложение А к СП 385.1325800.2018) и дополнительный коэффициент условий работы, понижающий расчетные сопротивления, использование которого оговорено в п. 5.11 и приложении В к СП 296.1325800.2017. При расчете на действие особых загружений по умолчанию используются нормативные, а не расчетные свойства материалов (см. п. 5.6 СП 296.1325800.2017). Поскольку данный пункт был исключен Изменением № 2 к СП 296.1325800.2017, пользователь может (используя дополнительные настройки) сам выбрать какие свойства материалов (расчетные или нормативные) использовать.

Отметим, что в нормах нет данных о нормативных значениях величины сопротивления поперечной арматуры. Поэтому при расчете используется величина равная $R_{sw}\gamma_s$, $\gamma_s$=1,15 (коэффициент надежности по арматуре). Аналогично вычисляется нормативное значение сопротивления арматуры сжатию. Пользователь может также ввести коэффициент снижения граничной относительной высоты сжатой зоны, который оговорен в некоторых нормах проектирования в сейсмических районах (см., например, п. 6.7.2 СП 14.13330). По умолчанию

используется значение этого коэффициента, равное 0.85. Тот факт, что пользователь должен/может сам вводить значение этого коэффициента, связан с тем, что в нормах даны значения этого коэффициента только для некоторых частных случаев (расчетная сейсмичность 7, 8 или 9 баллов). Что следует делать в ситуации, когда сейсмичность не выражается целым числом баллов или числом баллов больше 9, нормы не указывают.

- **Признак статической неопределенности системы**.

### Подбор с ограничением

При подборе арматуры в пластинах предусмотрена возможность учета следующих ограничений на минимальное армирование:

**Учитывать требования норм по минимальному проценту армирования** — при активации одноименного маркера процент армирования пластины определяется как для стержня прямоугольного сечения (вырезанного из пластины), одна из граней которого (ширина) равна 1м, а вторая грань (высота) — равна толщине пластины. В результате подбора обеспечивается такая погонная площадь армирования, которая не меньше площади, необходимой для удовлетворения требований норм по минимальному проценту армирования.

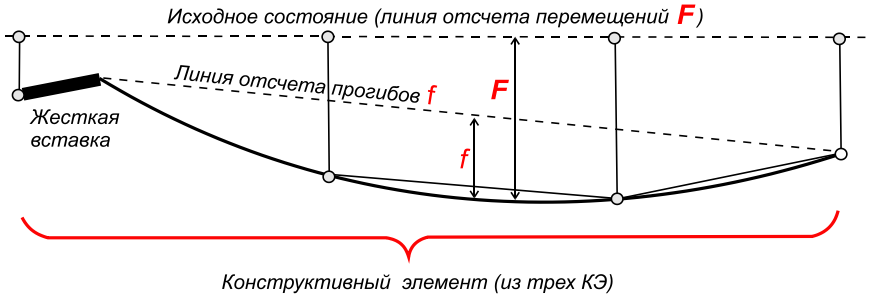
**Учитывать заданное армирование** — если для конкретного конечного элемента, входящего в конструктивную группу, задано армирование, то при активном одноименном маркере в результате подбора погонная площадь арматуры будет не меньше, чем погонная площадь заданной арматуры.

**Учитывать минимальное армирование** — при активации одноименного маркера появляется таблица, в которой для конструктивной группы можно задать схему армирования (диаметры и шаги). В результате погонная площадь подобранной арматуры будет не меньше погонной площади арматуры, заданной для конструктивной группы.

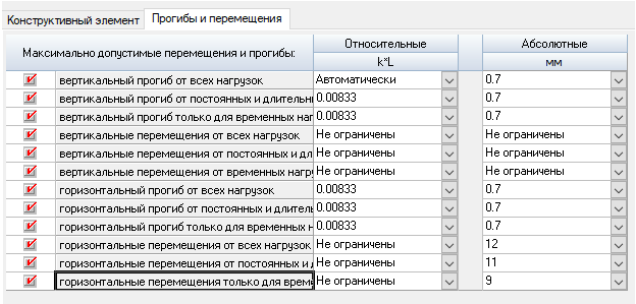
### Учет максимально допустимых прогибов и перемещений

Учет максимально допустимых горизонтальных и вертикальных прогибов и перемещений выполняется в соответствии с рекомендациями выбранного для расчета нормативного документа. Например, в случае использования СП 20.13330.2011 проверки выполняются в соответствии с разделом Е.2.1 Приложения Е, а при работе с ДСТУ Б.В.1.2-3:2006 (Прогибы и перемещения) — в соответствии с пунктом 5.1 раздела 5.

Линией отсчета прогибов считается прямая, которая соединяет начало и конец гибкой части конструктивного элемента. Ниже на рисунке показан пример, в котором конструктивный элемент состоит из трех конечных элементов.




Проверка выполняется на основе параметров, выбираемых из соответствующей таблицы на странице **Прогибы и перемещения**.




Предусмотрена возможность задания как относительных, так и абсолютных значений допустимых прогибов и перемещений. В первом случае рассматриваются следующие варианты учета перемещений (выбор варианта выполняется из выпадающего списка, соответствующей графы таблицы учета вертикальных перемещений):

- **Не ограничены** — прогибы и перемещения не учитываются при проверке;
- **Автоматически** — относительные (по отношению к длине конструктивного элемента) прогибы и перемещения, вычисляемые программно в зависимости от длины элемента; диапазон длин и соответствующие предельные перемещения определены нормативным документом;
- предельное значение выбирается из списка.

Абсолютные значения задаются пользователем или не учитываются, если выбран вариант «**Не ограничены**».

Если заданы одновременно и относительные и абсолютные ограничения, то при вычислении коэффициента использования ограничений принимается во внимание значение, дающее больший по величине коэффициент.

Необходимо отметить, что автоматическая проверка по относительному значению имеет смысл лишь в тех случаях, когда конструктивный элемент не имеет связей в пролете между концевыми узлами.

Учитывая тот факт, что существуют ситуации, когда конструктора интересуют прогибы и перемещения, вызываемые только переменными воздействиями (например, проверка зыбкости конструкции, или же случай, когда перемещения от действия собственного веса парированы строительным подъемом) в программе предусмотрена возможность выполнить проверки как для всех нагрузок, так и отдельно только для временных. Выбор вида расчета выполняется путем активации маркера в соответствующих строках и расчетных сочетаний. В любом случае проверки выполняются с учетом расчетных сочетаний прогибов и перемещений, полученных на основе нормативных (характеристических) значений нагрузок.



**Учет максимально допустимых перемещений и прогибов выполняется только в режиме экспертизы и не используется при подборе сечений.**

## Коэффициенты надежности по ответственности

Во всех расчетных режимах требуется задание информации о коэффициенте надежности по ответственности согласно выбранным нормам по надежности (ГОСТ 27751-88, ГОСТ 27751-2014, ДБН В.1.2-14-2009, …).

При расчете используются три коэффициента надежности по ответственности:

- для первого предельного состояния $\gamma_n$;
- для второго предельного состояния;
- для аварийного/особого состояния (используется также при анализе прогрессирующего обрушения и огнестойкости).

Коэффициент $\gamma_n$ может быть выбран из выпадающего списка в соответствии с характеристикой объекта строительства (объект *повышенной*, *нормальной* или *пониженной* ответственности) или введен пользователем (в нестандартных ситуациях).

ДБН В.1.2-14-2009 предусматривает три коэффициента надежности по ответственности (для первого предельного состояния, второго предельного состояния и аварийных ситуаций). Пользователь может задать каждый из этих трех коэффициентов. В ГОСТ 27751-88 предусмотрен только один коэффициент и этот коэффициент используется программой во всех расчетных ситуациях. Если в качестве норм по надежности выбран ГОСТ 27751-2014, то заданный пользователем коэффициент $\gamma_n$ используется при расчетах по первому предельному состоянию. При расчетах по второму предельному состоянию полагается $\gamma_n$=1.0 (чтобы избежать ситуации, при которой нормативные значения оказываются больше расчетных, этот коэффициент принимается не более чем $\gamma_n$ для первого предельного состояния). При анализе особых расчетных ситуаций используется $\gamma_n$=1.0 (см. п. 5.5 СП 296.1325800.2017).

## Дополнительные настройки

Рядом с иконкой, которая указывает на выбранные нормы проектирования, расположена кнопка  , которая позволяет активизировать специальное диалоговое окно для задания дополнительных параметров расчета.

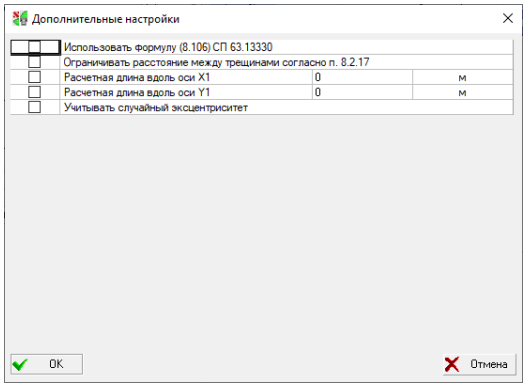



Рис. 19.6-3. *Диалоговое окно* **Дополнительные настройки**

- ***Ограничивать расстояние между трещинами согласно пункту 8.2.17***

Программа производит расчет пластинчатых элементов на основании теории Н.И. Карпенко (подробнее см. раздел 19.16), поскольку в СП 63.13330 приведены рекомендации по расчету плоскостных элементов только для частных случаев (плиты и балки-стенки). Четких указаний по расчету оболочечных элементов, в которых одновременно действует как мембранная, так и изгибная группы усилий, в нормах нет. В **SCAD** ширина раскрытия трещин определяется по рекомендуемым Н.И. Карпенко формулам типа $(\varepsilon_x+\varepsilon_y)l$, где $l$ — расстояние между трещинами, $\varepsilon_x$,$\varepsilon_y$ — относительные деформации в соответствующих направлениях.

СП 63.13330 для определения ширины раскрытия трещин в плоскостных элементах отсылает к разделу 8.2 (требуя при этом отказаться от учета крутящих моментов), в котором рассматривается трещинообразование стержневых элементов и содержится ограничение на расстояние между трещинами: “не менее 10 $d_s$ и 10 см и не более 40 $d_s$ и 40 см”. Авторам программы неизвестно, насколько обоснованным является такое ограничение применительно к пластинчатым элементам, поэтому по умолчанию данное ограничение не используется, но пользователь может его активировать, используя данную дополнительную опцию.

- ***Использовать формулу (8.106) СП 63.13330***

Используемый по умолчанию алгоритм расчета железобетонных плоскостных элементов описан в разделе 19.16. Этот алгоритм основан на двух раздельных расчетах — на действие $Q_x$ и действие $Q_y$. СП 63.13330 содержит следующую рекомендацию по расчету на действие поперечных сил — формула (8.106)

$$\frac{Q_x}{Q_{x,ult}}+\frac{Q_y}{Q_{y,ult}}\le 1.$$

Обоснованность данной формулы, в которой суммируются напряжения на различных площадках, авторам программы кажется весьма сомнительной. Исходя из условий правил сложения векторов, логичней было бы рассматривать поперечную силу $Q=\sqrt{Q_x^2+Q_y^2}$. Аналогичная рекомендация об анализе работы плоскостных элементов содержится, например, в статье С.Н. Карпенко "*О современных методах расчета высотных зданий из монолитного железобетона"*, Высотные здания, 2007, № 3, 34-39.

- ***Увеличивать продольную арматуру при реализации п. 8.1.34 СП 63.13330***

Появившийся в СП 63.13330 пункт 8.1.34 регламентирует учет продольной силы при анализе работы стержневого элемента на действие поперечных сил. Очевидно, что данный пункт заимствован из EN 1992-1-1 (см. п. 6.3.2). Но в отличие от Eurocode, в котором коэффициент $\varphi_n$ используется только в случае преднапряженных конструкций, СП 63.13330 требует использовать данный коэффициент и при отсутствии преднапряжения.

При сравнительно больших продольных силах подбор поперечной арматуры можно производить двумя способами. Первый (используемый по умолчанию) состоит в том, что после подбора продольной арматуры производится подбор поперечной. Ранее подобранная продольная арматура учитывается при вычислении коэффициента $\varphi_n$, но площадь продольной арматуры не меняется при подборе поперечной арматуры. Второй способ состоит в том, чтобы, зафиксировав тот факт, что величина $\varphi_n$ слишком мала, попытаться (это не всегда возможно) увеличить площадь продольной арматуры и подобрать поперечную. Второй вариант в большинстве случаев приводит к неоправдано высокому проценту армирования (более эффективным является увеличение опалубочных размеров сечения) и по умолчанию не используется. Однако данная опция позволяет пользователю ее активировать.

- ***Игнорировать кручение***

Эта опция может быть использована при расчетах по EN 1992-1-1. Введение данной опции связано с тем, что п. 6.3.1(2) EN 1992-1-1 упоминает достаточно широкий набор ситуаций, при которых нет необходимости учитывать кручение. Кроме того, отказ от расчета на действие крутящего момента позволяет обойти одну нелогичность EN 1992-1-1. Дело в том, что при отсутствии крутящего момента расчет на действие поперечной силы учитывает как сопротивление бетона, так и сопротивление арматуры (см. п. 6.2.3). Если же имеет место одновременное действие поперечной силы и крутящего момента, то п. 6.3.2(4) ограничивает сопротивление несущей способностью бетона.

- ***Реализация п. 8.1.34 СП 63.13330***

В СП 63.13330 появился п. 8.1.34, который регламентирует расчет на действие поперечных сил при внецентренном сжатии/растяжении. Следует отметить, что правила вычисления коэффициента $\varphi_n$ в этом пункте почти дословно заимствованы из EN 1992-1-1, но в EN 1992-1-1 данные правила относятся только к преднапряженным элементам. Кроме того, п. 8.1.34 СП 63.13330 оставляет открытым вопрос о правилах вычисления коэффициента $\varphi_n$ в том случае, когда среднее напряжение от действия растягивающей силы $\sigma_t$ превышает $R_{bt}$. По умолчанию в этом случае в программе используется $\varphi_n=10^{-6}$, однако другим возможным (и достаточно логичным) может быть использование $\varphi_n=0.5$ (значение, которое соответствует $\sigma_t = R_{bt}$). Для того, чтобы избежать выше перечисленных проблем, программа предоставляет возможность пользователю взять на себя ответственность и самому установить нижнюю границу коэффициента $\varphi_n$ при растяжении, а также верхнюю и нижнюю границы $\varphi_n$ при сжатии. В частности, установив значения всех границ в 1.0, пользователь получает расчет, соответствующий рекомендациям EN 1992-1-1, а установив значение

нижней границы $\varphi_n$ равным 0.5, пользователь получает «альтернативный» вариант определения $\varphi_n$ при $\sigma_t > R_{bt}$.

Изменение № 2 к СП 63.13330.2018 меняет правила вычисления коэффициента $\varphi_n$. При выборе в качестве норм проектирования СП 63.13330.2018 это изменение будет учтено, но специальная опция позволяет отказаться от использования этого изменения.

- ***Контроль гибкости***

По умолчанию **SCAD** не производит вычисление факторов по гибкости. Одноименный маркер позволяет «заказать» вычисление факторов по гибкости в режиме экспертизы для внецентренно сжатых стержневых элементов и указать значение предельной гибкости. При подборе армирования контроль гибкости не производится.

- ***Фактор по нормализованной нормальной силе***

При расчете железобетонных пластичных стен на действие сейсмических воздействий п. 5.4.3.4.1(2) EN 1998-1 требует ограничивать величину нормализованной осевой силы значением 0.4. Активация данного маркера приводит к тому, что при экспертизе будет дополнительно вычисляться фактор равный $N/(0.4 \cdot A \cdot f_{cd})$, который позволит контролировать выполнение данного требования.

- ***Увеличивать расчетные поперечные силы для сейсмических комбинаций***

Данный маркер позволяет при расчете на сейсмические воздействия использовать значения поперечных сил, увеличенное на 50%, и тем самым удовлетворить требование п. 5.4.2.4(7) EN 1998-1.

- ***Использовать трехлинейную диаграмму работы бетона при расчетах по прочности***

При расчетах по первому предельному состоянию по умолчанию программа использует двухлинейную диаграмму работы бетона. Такой выбор значения по умолчанию обусловлен тем, что в п. 6.1.16 СП 311.1325800 и п. 8.26 СТО 36554501-006-2006 требуют использовать именно такую диаграмму. В то же время СП 63.13330 позволяет использовать как двухлинейную так и трехлинейную диаграмму. Данный параметр позволяет переключиться в режим работы с трехлинейной диаграммой.

- ***Учитывать работу растянутого бетона в нелинейной деформационной модели при анализе прочности***

Большинство нормативных документов при расчетах по первому предельному состоянию требуют не учитывать работу растянутого бетона. Но при расчетах прочности нормальных сечений на основе нелинейной деформационной модели в некоторых нормах сказано, что "*сопротивление бетона растянутой зоны* **допускается** *не учитывать*" (см. п. 6.1.2 ДБН В.2.6-98:2009 или п. 8.1.20 СП 63.13330). Данный параметр позволяет выполнять расчеты с учетом сопротивления растянутого бетона.

- ***Расчетная длина вдоль оси $X_1$ ($Y_1$)***

В нормативных документах правила учета продольного изгиба (эффектов второго порядка) достаточно четко оговорены для стержневых элементов. Для пластин формулировки норм не столь четкие. Поэтому учет этих эффектов в программе сделан опциональным. Если пользователь задал расчетную длину для оси $X_1$ (аналогично для $Y_1$), то при наличии сжимающей силы $N_x$ момент $M_x$ будет увеличен на коэффициент продольного изгиба $\eta$.

- ***Учитывать случайный эксцентриситет (геометрические несовершенства)***

В нормативных документах правила учета геометрических несовершенств (случайного эксцентриситета) достаточно четко оговорены для стержневых элементов. Для пластин формулировки норм не столь четкие. Поэтому учет этих эффектов в программе сделан опциональным. При расчетах по EN 1992 при наличии сжимающей силы $N_x$ (аналогично для $N_y$) используется минимальный эксцентриситет, равный $e_0$=max($h$/30; 20 мм), где $h$ — толщина пластины. При расчетах по СНиП, ДБН, СП $e_0$=max($L$/600;$h$/30; 10 мм), где $L$ — соответствующая расчетная длина, которую задал пользователь (см. выше). Если при расчетах по этим нормативным документам не заданы расчетные длины, то величина минимального эксцентриситета будет вычислена без учета члена $L$/600.

- ***Ограничение напряжений***

При расчетах по второму предельному состоянию по EN 1992-1-1 (п. 7.2) или ДБН В.2.6-98:2009 (п. 5.2 ДСТУ Б В.2.6-156-2010) в некоторых случаях требуется ограничение уровня напряжений для предотвращения образования продольных микротрещин. Данная опция позволяет при экспертизе железобетонных конструкций вычислить соответствующие факторы.

- ***Характеристики материалов при особых воздействиях***

При расчете на действие особых загружений по умолчанию используются нормативные, а не расчетные свойства материалов (см. п. 5.6 СП 296.1325800.2017). Поскольку данный пункт был исключен Изменением № 2 к СП 296.1325800.2017, пользователь может (используя соответствующий маркер) сам выбрать, какие свойства материалов (расчетные или нормативные) использовать.

## Дополнительная информация по исходным данным

При подготовке исходных данных некоторые значения можно не задавать — они принимаются по умолчанию согласно указаниям норм. В частности, значения по умолчанию предусмотрены для следующих параметров:

- **коэффициенты условий работы продольной и поперечной арматуры**. Этими коэффициентами можно откорректировать значения расчетных сопротивлений $R_s$, $R_{sc}$, $R_{sw}$, по умолчанию принимаются равными 1;
- **коэффициенты учета сейсмического воздействия**. При расчете на сейсмическое воздействие в диалоговом окне **Армирование стержней/пластин** вводятся два коэффициента: один используется при расчете по прочности нормальных сечений, а второй — наклонных сечений железобетонных элементов. Эти коэффициенты учитываются для тех РСУ, в состав которых входит сейсмическое загружение, и их значения по умолчанию задаются равными соответственно 1.2 и 0.9. Если данная конструкция не рассчитывалась на сейсмическое воздействие, то значения коэффициентов в этих позициях не учитываются;
- **случайный эксцентриситет** в плоскостях $X_1OZ_1$ и $X_1OY_1$ задается только для стержней. Если величина случайного эксцентриситета задана равной нулю, то при расчете будет использоваться значение, вычисленное в соответствии с п. 1.21 СНиП 2.03.01-84*, КМК 2.03.01-96 (п. 4.2.6 СП 52-101-2003, пп. 7.1.7, 8.1.7 СП 63.13330). Если задан ненулевой случайный эксцентриситет, то будет использовано б*о*льшее из двух значений: вычисленного согласно нормам и заданного значения (согласно п. 3.50 Пособия к СНиП 2.03.01-84* и п. 3.6 Пособия к СП 52-101-2003 и пп. 7.1.7, 8.1.7 СП 63.13330);

- если расчет выполняется по СП 63.13330, то появляется возможность задать коэффициенты условий работы бетона и арматуры (продольной и поперечной) в соответствии с приложением Б к СП 296.1325800.2017 (кроме того, для таких загружений будет использоваться коэффициент надежности по ответственности $\gamma_n$=1,0 в соответствии с п. 5.5

СП 296.1325800.2017). Кроме того, может быть учтен дополнительный коэффициент условий работы, понижающий расчетные сопротивления, использование которого оговорено в п. 5.11 и приложении В к СП 296.1325800.2017.

- при расчете на действие особых загружений по умолчанию используются нормативные, а не расчетные свойства материалов (см. п. 5.6 СП 296.1325800.2017). Поскольку данный пункт был исключен Изменением № 2 к СП 296.1325800.2017, пользователь может (используя дополнительные настройки) сам выбрать, какие свойства материалов (расчетные или нормативные) использовать.



**Если конструктивный элемент (например, колонна) состоит из нескольких конечных элементов и имеет постоянную по длине продольную силу, то каждому конечному элементу необходимо назначать расчетную длину, соответствующую расчетной длине конструктивного элемента. В других случаях при задании расчетных длин следует использовать значения, полученные в режиме анализа устойчивости.**

**При задании расчетных длин равными нулю величина продольной силы игнорируется, и стержень будет армироваться как изгибаемый (даже если в группе армирования он маркирован как сжато-изогнутый).**

В таблице 19.6-1 приведены коэффициенты, задаваемые в исходных данных, и их учет в характеристиках бетона и арматуры.

**Таблица 19.6-1**

| Коэффициент | | Характеристики по СНиП | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $E_b$ | $R_b$ | $R_{bt}$ | $R_s$, $R_{sc}$ | $R_{sw}$ |
| Условий твердения бетона | | + | | | | |
| $\gamma_{b2}$ = 1.1* | | | v | v | | |
| $\gamma_{b2}$** | | | v | v | | |
| Результирующий $\gamma_b$ без учета $\gamma_{b2}$ | | | + | + | | |
| Продольной арматуры | | | | | + | |
| Поперечной арматуры | | | | | | + |
| Учета сейсмического воздействия | нормальные сечения | | v | | w | |
| | наклонные сечения | | | v | | w |

Условные обозначения к таблице 0-1:

* — коэффициент $\gamma_{b2}$ из п. 2б таблицы 15 СНиП 2.03.01-84*;

** — коэффициент $\gamma_{b2}$ из п. 2а таблицы 15 СНиП 2.03.01-84* (берется из исходных данных);

\+ — коэффициент учитывается всегда;

v — один коэффициент из соответствующего столбца таблицы учитывается всегда;

w — учитывается при наличии сейсмических загружений.

При расчетах по СП 52-101-2003 и СП 63.13330 пользователь должен ввести несколько коэффициентов работы бетона. Их использование аналогично описанному в приведенной выше таблице 19.6-1. Особенность состоит только в том, что согласно этим нормативным документам на коэффициенты $\gamma_{b2}$ (учет характера разрушения) и $\gamma_{b3}$ (учет вертикального положения при бетонировании) умножается только величина $R_b$.

На странице **Бетон** (рис. 19.6-4) задается следующая информация: вид бетона, класс бетона, коэффициенты условий работы бетона, условия твердения и коэффициент условий твердения.

Класс тяжелого и мелкозернистого бетона выбирается из списка **Класс бетона**. Для легкого бетона сначала следует выбрать марку по средней плотности, а затем класс бетона и заполнитель.

Если расчет производится по СП 52-101-2003, то доступен только тяжелый бетон, поскольку правила проектирования из других видов бетона в этом документе не оговариваются. Коэффициенты условий работы бетона задаются в таблице на данной странице.

Коэффициент условий работы бетона $\gamma_{b2}$ ($\gamma_{b1}$ в случае расчета по СП 52-101-2003 и СП 63.13330) учитывает длительность действия нагрузки. Величина коэффициента задается равной 1 или 0,9 (поз. 2 а таблицы 15 СНиП 2.03.01-84* и п. 5.1.10 а СП 52-101-2003 и п. 6.1.12

СП 63.13330) и по умолчанию принимается равной единице. В тех случаях, когда по условиям расчета необходимо принять другое значение этого коэффициента, оно может быть задано непосредственно в окне списка.

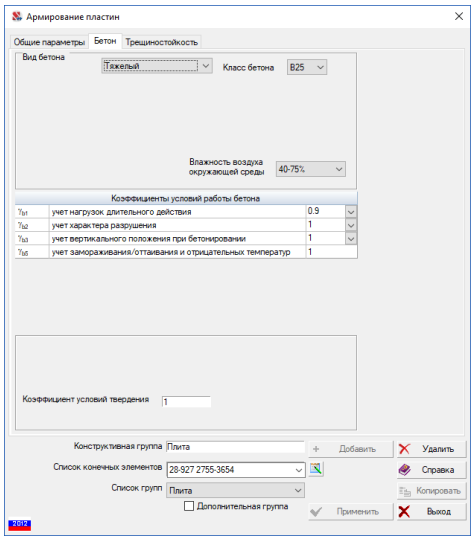
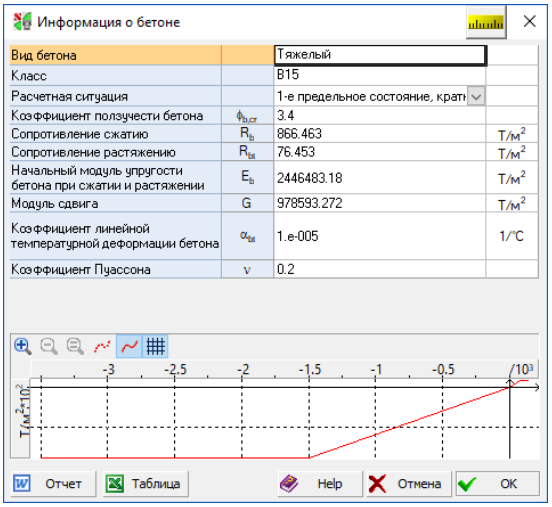



Рис. 19.6-4. *Страница* **Бетон**

**Если в комбинацию загружений входят кратковременные нагрузки, в расчете принимается $\gamma_{b2}$ = 1,1 (независимо от того, какое значение было задано) в соответствии с указаниями поз. 2 *б* таблицы 15 СНиП 2.03.01-84*. Аналогичные действия производятся при расчетах по СП (в которых обозначение $\gamma_{b2}$ заменено на $\gamma_{b1}$, а величина 1,1 заменена на 1,0).**

Если величина начального модуля упругости бетона отличается от табличного значения, то задается коэффициент условий твердения бетона, с помощью которого выполняется корректировка этого значения (назначается только при естественном твердении бетона).

Кнопка  активизирует диалоговое окно, в котором приведены расчетные параметры материала.




Выпадающий список **Расчетная ситуация** позволяет выбрать тип расчета (1-е предельное состояние, 2-е предельное состояние, ...) параметры для которого следует отобразить.

В тех случаях, когда требуется расчет по образованию и раскрытию трещин, должна быть введена информация о категории трещиностойкости, допустимой ширине раскрытия трещин и т. п. Все эти данные вводятся на странице **Трещиностойкость** (рис. 19.6-5).

Если назначается 1-я категория трещиностойкости (отсутствие трещин), то дополнительная информация на этой странице не задается.

Если расчет производится по СНиП 2.03.01-84*, КМК 2.03.01-96 и выбрана 3-я категория трещиностойкости (рис. 19.6-5, *а*), то необходимо из соответствующих списков выбрать условия эксплуатации конструкции, режим влажности бетона и влажность воздуха окружающей среды, после чего назначить допустимую ширину кратковременного и длительного раскрытия трещин (по умолчанию принимаются значения, рекомендуемые СНиП 2.03.01-84*, КМК 2.03.01-96 из условий эксплуатации конструкции и параметров влажности).

Если расчет производится по СП 52-101-2003 или СП 63.13330 и в выпадающем списке выбран пункт **Ограниченная ширина раскрытия трещин** (рис. 19.6-5, *б*), то следует задать требования к ширине раскрытия трещин (*из условия сохранности арматуры* или *из условия ограничения проницаемости конструкций*). При этом будут автоматически установлены рекомендуемые п. 7.2.3 СП 52-101-2003 или п. 8.2.6 СП 63.13330 максимально допустимые ширины продолжительного и непродолжительного раскрытия трещин. При необходимости пользователь может откорректировать эти значения.

Необходимо обратить внимание на неточность, допущенную в СП 52-101-2003, относительно использования коэффициента надежности по нагрузке при расчете по предельным состояниям второй группы. В п.7.1.3 этого документа указано, что «При расчете по предельным состояниям второй группы нагрузки принимаются с коэффициентом надежности по нагрузке $\gamma_f$ = 1,0.». При этом не разделены такие понятия, как расчет по образованию трещин и расчет по их раскрытию и закрытию. Это приводит к тому, что все виды расчета выполняются с учетом нормативных нагрузок. В СНиП 2.03.01-84*, КМК 2.03.01-96 и СП 63.13330 эта неточность отсутствует и при расчете по образованию трещин принимаются расчетные значения нагрузок, т.е. $\gamma_f > 1,0$.

***В SCAD++ для СП 52-101-2003 при расчете по образованию трещин используются расчетные значения нагрузок, если выбрано требование отсутствия трещин.***

*а)* *б)*

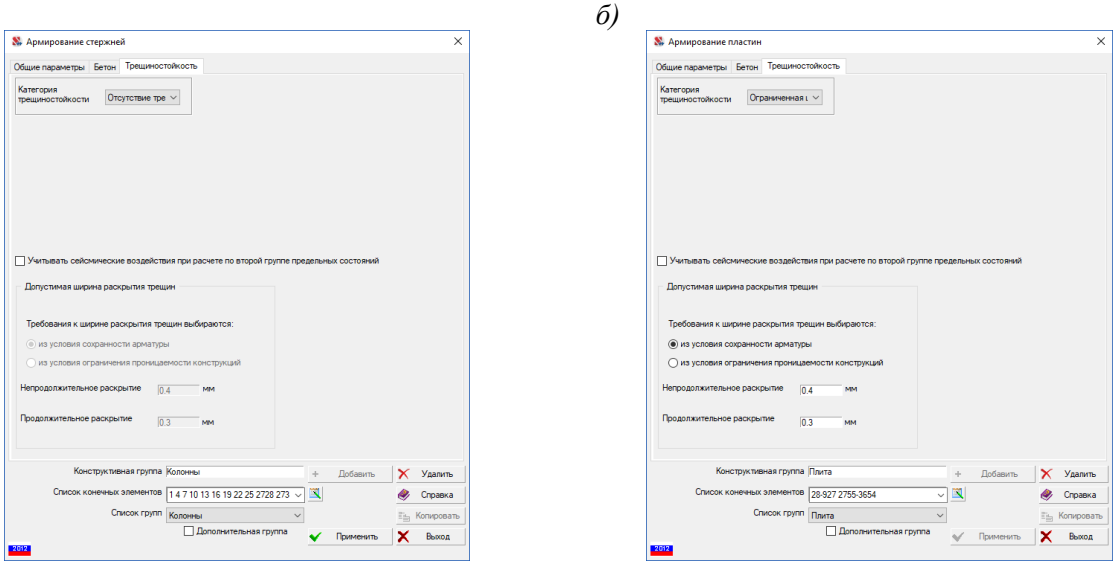



Рис. 19.6-5. *Данные о трещиностойкости*

При расчете по СП 52-101-03 п. 3.52 Пособия указывает, как учесть влияние продольной силы при расчете на действие поперечных сил. Отметим, что в п. 3.52 в формуле для величины $N_b$=1,3$R_bA$ не учтена продольная арматура. Существует письмо авторов СП, в котором описывается альтернативный способ вычисления величины $N_b$ с учетом наличия продольной арматуры ($N_b$=$R_bA$+$R_sA_{s,tot}$). При использовании СП 52-101-03 пользователь может установить маркер, позволяющий программе при экспертизе использовать эту формулу для определения $N_b$. Так как наличие вышеупомянутого письма дает два метода расчета $N_b$ (по СП или по письму), программа вычисляет $N_b$ двумя разными способами и использует наибольшее значение.

В поле ввода **Конструктивная группа** записывается имя конструктивного элемента или группы. Имя должно быть задано обязательно.

**Список групп** включает перечень ранее сформированных конструктивных групп.

В нижней части диалогового окна (рис. 19.6-6) расположен список *конечных элементов*, в котором перечислены номера элементов, входящих в конструктивный элемент или группу. Этот список можно откорректировать непосредственно в окне. Если при этом на схеме есть выбранные элементы, то с помощью набора операций, который открывается нажатием кнопки  , стоящей справа от списка, можно произвести следующие действия:

- **Создать список элементов по отмеченным элементам**, т. е. фактически заменить, ранее сформированный список элементов, на список из выбранных на схеме элементов;
- **Создать список по данным группы и отмеченным элементам**, т. е. добавить, в ранее сформированный список элементов, выбранные на схеме элементы;
- **Создать список по данным группы, исключив отмеченные элементы**, т. е. исключить из списка, ранее сформированной группы, выбранные на схеме элементы.

Для редактирования существующего списка группы используется одноименная кнопка  , нажатие которой приводит к появлению диалогового окна со списком элементов.

Если после манипуляций со списком элементов (до использования кнопки **Применить**) необходимо вернуться к его начальному состоянию, то следует воспользоваться первой операцией в рассматриваемом списке — **Создать список элементов по данным группы**, после выполнения которой будет восстановлен исходный список группы.

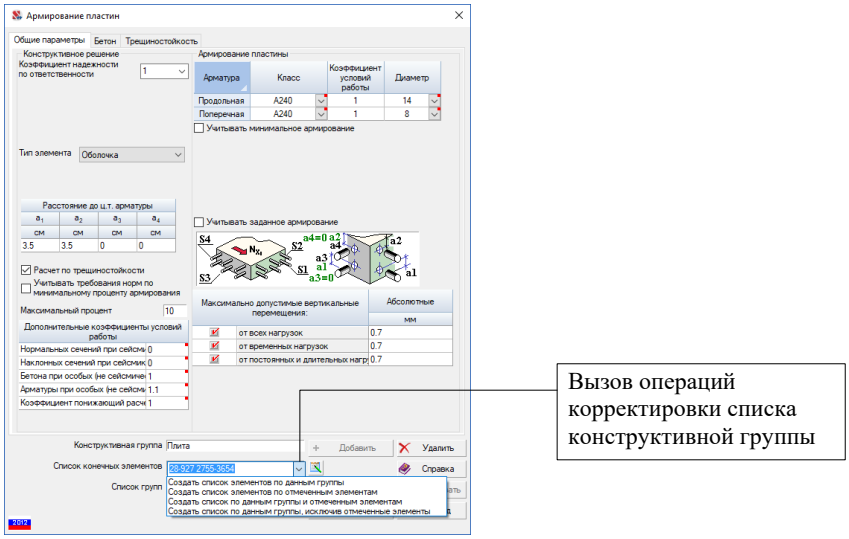



Рис. 19.6-6. *Корректировка списка элементов, входящих в конструктивную группу*

Для удаления конструктивного элемента или группы конструктивных элементов следует выбрать имя из списка инструментальной панели **Ввод данных** и нажать кнопку  . В появившемся диалоговом окне нажать кнопку **Удалить**.

Если удаляется несколько объектов, следует выполнить описанные выше операции для одного объекта, а затем, не выходя из диалогового окна, последовательно выбирать из списка конструктивных элементов (или групп) удаляемые объекты и нажимать кнопку **Удалить**.

Кнопка **Копировать** активирует диалоговое окно со списком групп. Выбрав из списка группу и нажав **ОК** можно произвести копирование данных из ранее созданной группы. Если данная кнопка нажата в тот момент, когда активной является страница **Общие параметры**, то копируются все данные на всех страницах (естественно, списки конечных элементов и имя группы не копируется). Если же нажатие кнопки производится при активной странице **Бетон**, то производится копирование только данных о бетоне. Аналогично для страницы **Трещиностойкость**.

### Корректировка исходных данных конструктивных групп

При внесении изменений в параметры ранее созданной группы конструктивных элементов следует:

- выбрать операцию **Ввод данных —**  в разделе **Железобетон** инструментальной панели, после чего появится соответствующая инструментальная панель;
- в списке **Группы армирования** выбрать имя корректируемой конструктивной группы (в инструментальной панели активируется соответствующая кнопка);
- нажать кнопку  — **Подтверждение**;
- в появившемся диалоговом окне **Армирование пластин** или **Армирование стержней** (в зависимости от типа элементов группы), внести нужные изменения в параметры группы и/или список элементов и нажать кнопку **Применить**;
- для выхода из окна нажать кнопку **Выход**.

При необходимости внесения изменений в параметры других групп — корректировки можно выполнить, не выходя из диалогового окна. Для этого достаточно выбрать имя корректируемой группы в списке групп и выполнить описанные выше действия.

### Разделение группы армирования на две группы и более

Если по результатам подбора арматуры группу конструктивных элементов необходимо разделить на две или более группы, то для этого следует:

- выбрать операцию **Ввод данных —**  в разделе **Железобетон** инструментальной панели, после чего появится соответствующая инструментальная панель;
- в списке **Группы армирования** выбрать имя группы (в инструментальной панели активируется соответствующая кнопка);
- нажать кнопку  — **Подтверждение**;
- в появившемся диалоговом окне **Армирование пластин** или **Армирование стержней** (в зависимости от типа элементов группы) задать в поле **Конструктивная группа** имя новой группы и нажать кнопку **Добавить**;
- откорректировать список элементов новой группы, удалив из него номера элементов, которые «остаются» в исходной группе;
- откорректировать параметры новой группы;
- выбрать в списке групп имя исходной группы и откорректировать список элементов, удалив из него элементы, перешедшие в новую группу;
- если необходимо — откорректировать параметры исходной группы;
- нажать кнопку **Применить**;
- для выхода из окна нажать кнопку **Выход**.

Перечисленные выше действия можно повторить для создания новых групп путем деления исходной группы.

## 19.7. Основные и дополнительные группы

Если некоторый конечный элемент одновременно принадлежит нескольким конструктивным элементам (или группам конструктивных элементов), то это порождает многочисленные проблемы и вопросы. Например, если выполнить подбор арматуры, то результаты какой группы следует считать результатом подбора? Какие результаты следует использовать при преобразовании подобранной арматуры в заданное армирование? На основании каких данных вычислять величину $K_{max}$ после проведения экспертизы при отображении коэффициента использования ограничений для всей схемы, а не для отдельного конструктивного элемента?

Для реализации такой возможности предусмотрено создание конструктивных групп, имеющих признак **Дополнительная группа** (рис. 19.7-1). Этот признак присваивается при создании группы и позволяет работать с набором конструктивных групп, имеющих совпадающие все или несколько конечных элементов. При использовании основных и дополнительных групп имеются следующие ограничения:

- конечный элемент не может одновременно принадлежать двум основным группам;
- дополнительные группы не используются при определении $K_{max}$ по всей схеме;
- дополнительные группы не используются при преобразовании результатов подбора арматуры в заданное армирование;
- если конечный элемент одновременно принадлежит основной и дополнительной группе (группам), то в информации об элементе при нажатии кнопок **Железобетон**. **Факторы**, **Арматура**, ... появляется меню с перечнем групп и следует выбрать группу, результаты которой следует отобразить;
- дополнительные группы не используются при расчете прогрессирующего обрушения.

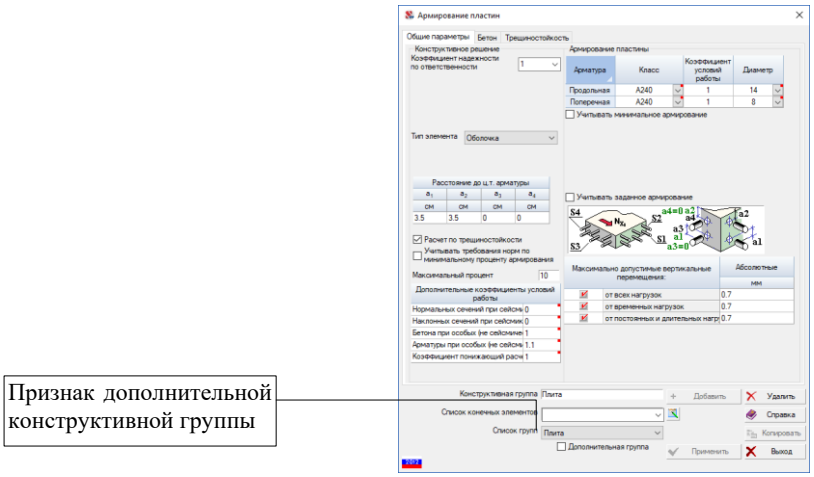



Рис. 19.7-1. *Диалоговое окно* **Армирование пластин** *(дополнительная группа)*

В списках конструктивных групп в инструментальных панелях и диалоговых окнах дополнительные группы отличаются зеленым фоном пиктограмм. При создании основных и дополнительных групп желательно обеспечивать уникальность их имен. Для замены статуса группы используется операция **Управление группами железобетонных конструктивных элементов**, рассмотренная ниже.

## 19.8. Селекция элементов группы



Если в списке конструктивных групп инструментальной панели **Ввод данных** выбрана группа конструктивных элементов или конструктивный элемент, то нажатие этой кнопки приводит к селекции всех конечных элементов группы. По умолчанию для селектированных узлов и элементов принят красный цвет. Смена цвета селекции выполняется в меню ***Настройки*** в разделе **Настройка цветовой схемы** (страница **Схема**, пункт **Выбор узлов и элементов**).

## 19.9. Режим визуализации активной группы



В тех случаях, когда не предполагается выполнение операций с выбранной конструктивной группой, а необходимо только выделить ее на схеме, используется операция визуализации конструктивной группы. Группа, выбранная в списке конструктивных групп инструментальной панели **Ввод данных**, будет «подсвечена» на схеме фиолетовым цветом.

## 19.10.Управление группами железобетонных конструктивных элементов



Операция используется для управления атрибутами конструктивных групп и позволяет выполнить следующие действия:

- переименование группы;
- сортировка групп по заданному признаку;
- удаление группы;
- объединение идентичных групп;
- изменение статуса конструктивных групп (присвоение или отмена признака дополнительной группы);
- изменение места выбранной группы в списке групп (кнопки **Вверх**, **Вниз**).

Активация операции приводит к появлению одноименного диалогового окна (см. рис. 19.10-1), со списком конструктивных групп. Графы таблицы конструктивных групп включают:

- текущий номер конструктивной группы;
- **№** — номер группы в порядке создания;
- **Тип** — пиктограмма типа конструктивной группы ( — стержневой конструктивный элемент, — группа стержневых конструктивных элементов; — группа пластинчатых конструктивных элементов). Если группа является дополнительной, то соответствующая икона имеет зеленый фон;
- **Имя** — имя конструктивной группы;
- **Количество элементов** в группе;
- **Дополнительная —** маркер, которым отмечаются дополнительные конструктивные группы.

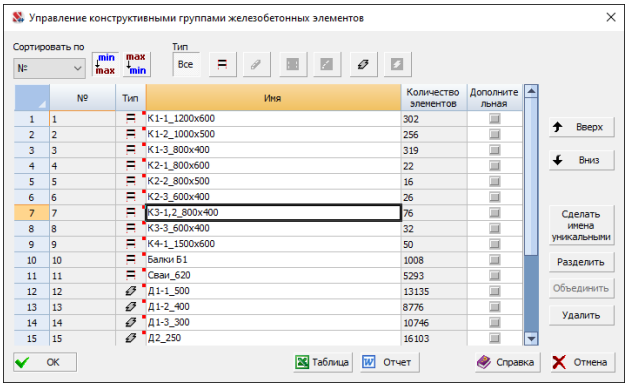



Рис. 19.10-1. *Диалоговое окно* **Управление конструктивными группами железобетонных элементов**

Для переименования группы следует установить курсор на имя нужной группы и дважды нажать левую кнопку мыши. Строка становится доступной для редактирования.

Характеристика группы, относительно которой выполняется сортировка, выбирается из списка **Сортировать по**. Предусмотрены следующие виды сортировок:

- по номеру (в очередности создания группы — при нажатой кнопке **Min/Max**; и наоборот — при нажатой кнопке **Max/Min**);
- по типу группы (при нажатой кнопке **Min/Max** первыми в списке будут конструктивные элементы, а затем группы конструктивных элементов и наоборот — при нажатой кнопке **Max/Min**);
- по имени группы (в алфавитном порядке при нажатой кнопке **Min/Max** и наоборот — при нажатой кнопке **Max/Min**);
- по количеству элементов в группе (по возрастанию количества элементов в списке конструктивных групп при нажатой кнопке **Min/Max** и наоборот — при нажатой кнопке **Max/Min**);
- по активному маркеру «Дополнительная».

Для удаления конструктивных групп их следует выделить в таблице, для чего указать курсором на текущий номер группы и нажать левую кнопку мыши. После чего нажать кнопку **Удалить**. Если удаляемые группы идут в списке подряд, то для их селекции следует установить курсор на первую в списке группу, нажать левую кнопку мыши и, не отжимая кнопку, провести курсор по номерам удаляемых групп.

Для изменения положения в списке одной или нескольких конструктивных групп необходимо отметить эти группы и переместить их по списку на нужное количество позиций нажатием на кнопки **Вверх** и **Вниз**.

Если при вводе данных пользователь создал несколько групп с одинаковыми именами, то кнопка **Сделать имена уникальными** позволяет автоматически переименовать (добавляя к имени суффикс № XXX) группы и получить неповторяющиеся имена.

Для объединения групп конструктивных элементов следует селектировать эти группы в списке, при нажатой кнопке **Ctrl** на клавиатуре, после чего нажать кнопку **Объединить**. Операция будет доступна только в случае совпадения всех параметров объединяемых групп конструктивных элементов. После активации операции появится диалоговое окно, в котором вводится имя объединенной группы.

Кнопка **Разделить** предназначена для автоматизации процесса коррекции ошибок в данных о конструктивных элементах и автоматического создания конструктивных элементов и групп конструктивных элементов. При нажатии этой кнопки для каждой выбранной группы производятся следующие действия.

В случае групп пластинчатых элементов

- Из списка элементов удаляются все элементы, не являющиеся пластинами.
- Для оставшихся элементов создаются конструктивные элементы путем объединения пластинчатых конечных элементов с одинаковой жесткостью, которые расположены в одной плоскости, образуют связную область, контактируя общими узлами;
- Все прочие параметры (материал, защитные слои, ...) наследуются из свойств первоначальной группы.

В случае групп стержневых элементов

- Из списка элементов удаляются все нестержневые элементы.
- Из списка элементов удаляются все элементы, которые не могут быть интерпретированы как железобетонные.
- Для оставшихся элементов создаются конструктивные элементы путем объединения стержней с одинаковой жесткостью, лежащих на одной прямой и последовательно примыкающих друг к другу. Кроме того, контролируется отсутствие шарниров в промежуточных узлах. Допускается наличие жестких вставок при условии, что для всех элементов эти вставки одинаковы.
- Все прочие параметры (материал, расчетные длины, ...) наследуются из свойств первоначальной группы.
- Для всех оставшихся после описанных выше действий конечных элементов формируются группы конструктивных элементов. При этом в каждую такую группу попадают конечные элементы с одинаковыми типами жесткостей.

Кнопки, расположенные в верхней части диалогового окна позволяют отфильтровать группы, которые следует отображать (например, заказать отображение только дополнительных групп пластинчатых конструктивных элементов).

Все назначения, сделанные в диалоговом окне, будут зафиксированы и выполнены после выхода из окна по кнопке **OK**. При этом положение конструктивных групп в списке инструментальной панели будет соответствовать их положению в списке диалогового окна.

## Назначение класса бетона и арматуры



Эту операцию используют в тех случаях, когда у нескольких конструктивных групп совпадают класс бетона и класс арматуры, т. е. можно задать указанные параметры одновременно нескольким или даже всем конструктивным группам. Кроме того, эта операция полезна при смене норм проектирования. После активации операции **Назначение классов бетона и арматуры** появляется одноименное диалоговое окно (рис. 19.10-2), в таблице которого перечислены все конструктивные группы с указанием назначенных для них классов бетона и арматуры.

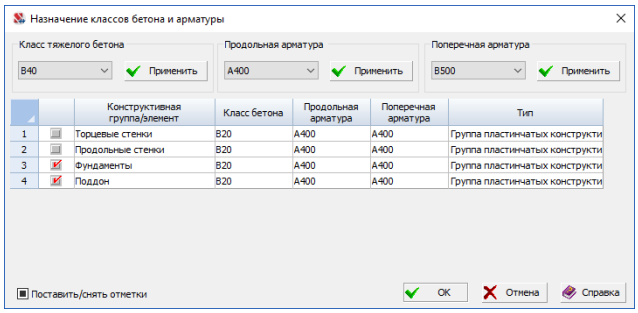



Рис. 19.10-2. *Диалоговое окно* **Назначение классов бетона и арматуры**

Для задания группам указанных параметров выполняются следующие действия:

- назначить класс бетона, а также классы продольной и поперечной арматуры, выбрав их из соответствующих списков;
- активировать маркеры, стоящие слева от названия конструктивной группы, для тех групп, которым назначается выбранный класс бетона;
- нажать кнопку **Применить**, относящуюся к классу бетона;
- выполнить аналогичные действия для класса продольной арматуры, а затем поперечной арматуры, активируя маркеры нужных конструктивных групп и нажимая соответствующие кнопки **Применить**;
- после назначения параметров нужным группам, выйти из окна нажатием кнопки **OK**.

Аналогичные назначения для каждой конструктивной группы в отдельности могут быть выполнены также в диалоговых окнах создания групп, а также в окнах **Армирование пластин** и **Армирование стержней** при создании или корректировке конструктивных групп непосредственно в процессе подбора арматуры. Приведенную операцию есть смысл использовать в случае назначения параметров большому количеству групп одновременно.

Кроме того, в колонке **Тип** указывается тип группы и для стержневых групп можно заменить *Конструктивный элемент* на *Группу конструктивных элементов* и наоборот.

## Информация о группах армирования

Данная операция позволяет получить диалоговое окно (рис. 19.10-3) с данными во всех группах армирования. Кнопка **Отчет** активирует создание отчетного элемента.

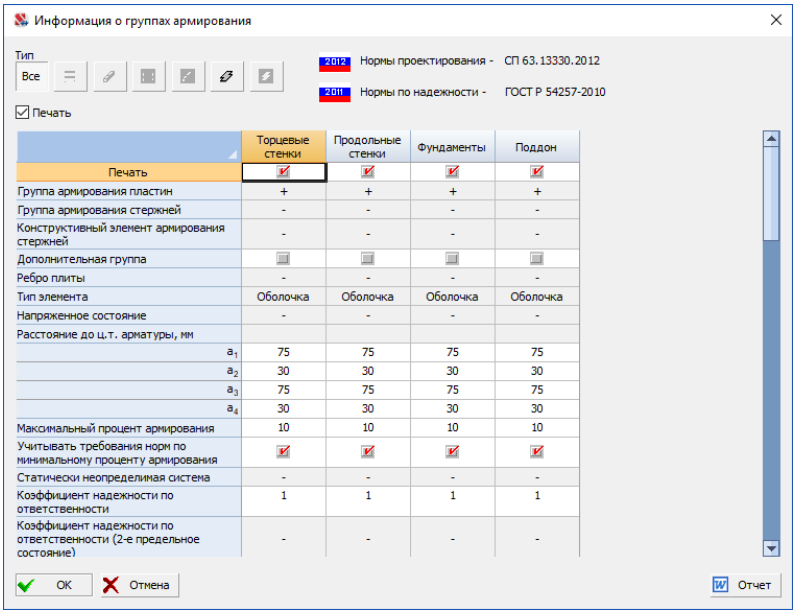
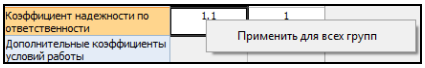



Рис. 19.10-3. *Диалоговое окно* **Информация о группах армирования**

Кнопки, расположенные в верхней части диалогового окна, позволяют отфильтровать группы, которые следует отображать (например, заказать отображение только дополнительных групп пластинчатых конструктивных элементов).

Маркеры в строке **Печать** позволяют отметить только те группы, информация о которых должна быть помещена в отчетный документ.

Кроме того, в данном окне некоторые данные можно изменять (коэффициенты расчетной длины, коэффициенты условий работы, ...). В случае ячеек с данными, которые могут быть изменены, в данном диалоге можно нажать правую кнопку мыши и в контекстном меню выбрать пункт **Применить для всех групп**. При этом данные, которые содержатся в активной ячейке, будут скопированы во все группы:




## 19.11.Настройка списка шагов арматуры

Данные об арматуре (подобранной или назначенной) в пластинчатых элементах могут быть представлены как в виде интенсивности (погонные площади) так и в виде **Диаметр/Шаг**. При этом используются шаги арматуры, которые назначает пользователь. Список таких шагов может быть задан (или изменен) с помощью специального диалогового окна (рис. 19.11-1), которое может быть активировано из окна дерева проекта путем обращения в меню ***Настройки*** к пункту **Настройка шагов арматуры**.

В этом окне находится таблица шагов (в *мм*), которая может быть изменена, путем замены значений, добавления шагов (кнопка **Добавить**), удаления шагов, которые (по мнению пользователя) не следует использовать (кнопка **Удалить**). Значения в таблице можно отсортировать по возрастанию (кнопка **Сортировать**). Если сортировка не сделана пользователем, то это будет сделано автоматически при выходе из диалогового окна. Кроме того, кнопка **Стандартные** позволяет загрузить в таблицу набор стандартных значений шагов.

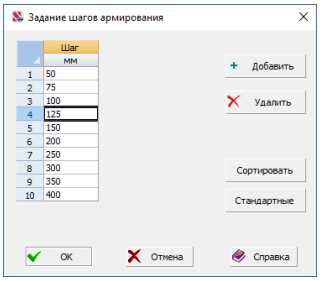


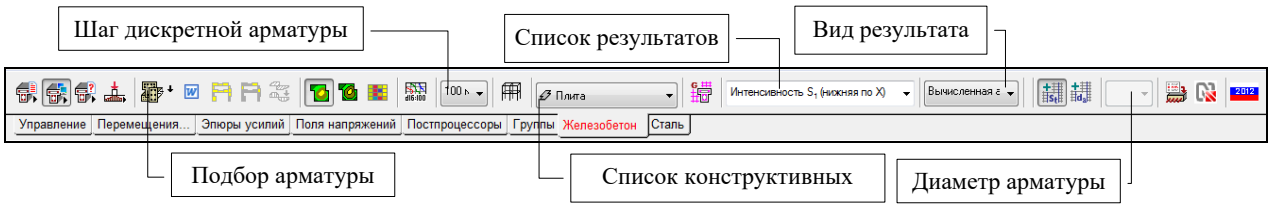

Рис. 19.11-1. *Диалоговое окно* **Задание шагов армирования**

## 19.12.Подбор арматуры

Подбор арматуры и отображение результатов подбора выполняется в разделе **Подбор арматуры** инструментальной панели **Железобетон**. Для выполнения подбора необходимо сформировать конструктивные элементы и/или их группы. Кроме того, для всех конечных элементов, входящих в эти конструктивные элементы и группы, должны быть вычислены расчетные сочетания усилий (РСУ).

**При подборе арматуры программа не проверяет конструктивные ограничения по размещению арматуры, полагая, что пользователь имеет возможность выполнить эту проверку неформальным способом. Кроме того, получив результаты подбора и убедившись в том, что конструктивные требования не могут быть выполнены, пользователь может принять решение о корректировке опалубочных размеров.**

Инструментальная панель режима **Подбор арматуры** включает кнопки вызова следующих операций:




— подбор арматуры;

— формирование отчета;

— эпюры армирования стержней;

— эпюры армирования стержней (цветовое отображение);

— смена оси отображения эпюр;

— переключение формы выдачи результата;

— изополя армирования пластин;

— изополя и изолинии армирования пластин;

— цветовая карта армирования пластин;

— возврат к отображению расчетной схемы;

— режим визуализации активной группы;

— дополнительное армирование сетками;

— дополнительное армирование стержнями;

— индикация выбранных норм проектирования;

— преобразование результатов подбора в заданное армирование;

— экспорт результатов армирования в ALLPLAN.

Для активации расчета используется кнопка **Подбор арматуры** — в одноименном разделе инструментальной панели. Данная кнопка содержит стрелку дополнительных возможностей, которая позволяет, кроме полного подбора для всех конструктивных групп, выполнить подбор только для тех групп, в которые вносились изменения, произвести расчет только выбранных

пользователем групп (в этом случае появится диалоговое окно со списком групп, и пользователь должен произвести выбор), активировать операции контроля данных (без проведения расчета), просмотр сообщений, которые выводились при предыдущем расчете или контроле и удаление результатов. Независимо от того, вносились ли изменения во все конструктивные группы или только в часть из них, контроль исходных данных выполняется для всех групп и, соответственно, диагностические сообщения будут выданы для всех групп, а не только для тех, которые пересчитывались.

Ход подбора отображается в окне **Выполнение расчета**. Сообщения, появляющиеся в процессе подбора, выводятся после завершения расчета в информационном окне и журнале. По результатам подбора может быть сформирован отчет (кнопка  ).



**Отметим, что при подборе арматуры в пластинчатых элементах производится увеличение подобранной площади арматуры на 5%, что позволяет учесть возможное возрастание силовых факторов у краев элемента (при подборе арматуры используются значения усилий в центре конечного элемента).**

**Подбор арматуры в стержневых элементах производится на основании расчетных сочетаний усилий в нескольких сечениях стержня (количество сечений назначает пользователь). При подборе арматуры производится увеличение подобранной площади арматуры на 5%, что позволяет учесть возможное возрастание силовых факторов в промежуточных сечениях. Кроме того, такое увеличение позволяет "защититься" от того, что усилия в SCAD определены без учета возможного образования трещин и связанного с этим ослабления сечения.**

## Вывод результатов подбора

*Для стержневых элементов* результаты подбора отображаются в виде эпюр, в том числе и с использованием цветовых шкал. Это площади симметричного и несимметричного армирования для верхней, нижней и боковой арматуры — $S_1$, $S_2$, $S_3$, $S_4$ (для кольцевых и круглых сечений — только симметричное армирование $S_1$). Кроме того, отображаются процент армирования и ширина раскрытия трещин. Представление результатов подбора в виде набора стержней предусмотрено только в информации об элементе.

При отображении эпюр армирования стержень разбивается на $n$ участков, где $n$ — число сечений в стержне. Длины первого и последнего (по длине стержня $L$) участков равны $\frac{L}{2(n-1)}$, а длины всех остальных (промежуточных) участков равны $\frac{L}{(n-1)}$. Значение фактора на каждом участке эпюры принимается равным максимальному значению по всем сечениям стержня, попавшим в данный участок.

*Для всех видов армирования пластинчатых элементов* предусмотрен вывод интенсивности (погонной площади) армирования в виде изолиний, изополей или цветовых карт. При этом результаты подбора продольной арматуры могут быть представлены набором стержней по направлениям, совпадающим с направлениями выдачи усилий. Для активации этой операции используется кнопка  — **Переключение формы выдачи результатов армирования**, а шаг арматуры выбирается из одноименного списка в инструментальной панели.

Определение процента армирования пластин выполняется по следующим правилам — рассматривается стержень прямоугольного сечения, размером $b \times H$, где $b$ = 1м, а $H$ равно толщине пластины. Процент армирования в направлении X и Y определяется по формулам:

$$\mu_x = (S_1 + S_2)/(H_x \times b) \times 100,$$

$$\mu_y = (S_3 + S_4)/(H_y \times b) \times 100,$$

$$S_1 = s_1 \times b / step_1,$$
$$S_2 = s_2 \times b / step_2,$$
$$S_3 = s_3 \times b / step_3,$$
$$S_4 = s_4 \times b / step_4,$$

где

$s_1$, $s_2$, $s_3$, $s_4$ — площадь сечения одного стержня соответствующей арматуры,
$step_1$, $step_2$, $step_3$, $step_4$ — шаг арматуры.

Величины $H_x$ и $H_y$ определяются следующим образом:

$$\begin{cases} H_x = H - a_1, \\ a_2 > 0, H_x = \max(H_x, H - a_2), \end{cases}$$
$$\begin{cases} H_y = H - a_3, \\ a_4 > 0, H_y = \max(H_y, H - a_4), \end{cases}$$

где $a_1$, $a_2$, $a_3$, $a_4$ — расстояние до центра тяжести арматуры.

Для балок-стенок в качестве $H_x$ и $H_y$ используется величина $H/2$.

В программе предусмотрен вывод результатов подбора продольной арматуры в форме дополнительного армирования, которое может быть выполнено сетками или отдельными стержнями. При армировании сетками (кнопка  ) необходимо назначить шаг следования стержней в сетке, который выбирается из списка **Выбор шага арматуры**. Если дополнительное армирование задается стержнями (кнопка  ), то диаметр стержней выбирается из списка **Диаметр стержней дополнительного армирования**.

При выводе результатов подбора арматуры в отдельном списке пользователь может указать какой вариант его интересует.

Для пластинчатых элементов предусмотрено четыре варианта

1. Вычисленная арматура
2. СНиП
3. Вычисленная арматура (по сортаменту)
4. СНиП (по сортаменту)

Второй вариант отличается от первого тем, что учитываются требования норм по минимальному проценту армирования (для стержневых элементов подбор арматуры всегда осуществляется с учетом минимального процента армирования, а следует ли это делать для пластин в нормах четко не оговорено).

Варианты 3, 4 аналогичны 1, 2, но при этом требуемая интенсивность армирования вычисляется с учетом того, что диаметры стержней и шаги арматуры могут принимать только дискретные наборы значения.

Для стержневых элементов варианты 1-2 и 3-4 идентичны.

## Преобразование результатов подбора арматуры



При проведении экспертизы пластинчатых элементов железобетонных конструкций (например, при расчете на прогрессирующее обрушение) продольное и поперечное армирование задается диаметром арматурных стержней и их шагом. Эта информация может быть подготовлена пользователем или сформирована автоматически, путем преобразования данных, полученных в результате работы программы подбора арматуры. При этом учитывается заданное пользователем количество диапазонов распределения арматуры (диаметр – шаг) для каждого вида продольной и поперечной арматуры.

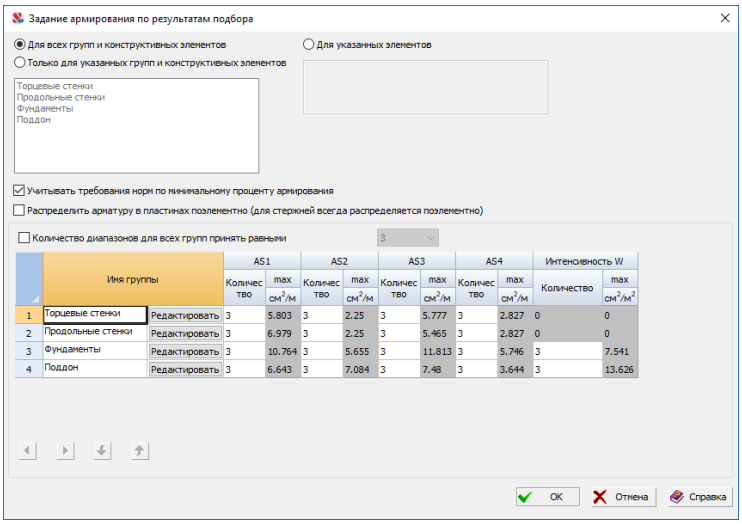



Рис. 19.12-1. *Диалоговое окно* **Задание армирования по результатам подбора**

Преобразование выполняется операцией **Задание армирования по результатам подбора**, которая вызывается нажатием кнопки —  в разделе **Подбор арматуры**. После активации указанной операции появляется одноименное диалоговое окно (см. рис. 19.12-1), в таблице которого приведены имена конструктивных групп, максимальное значение площади каждого вида арматуры, а также количество диапазонов, на которые необходимо разбить площадь арматуры данного вида при переходе от теоретической (подобранной) арматуры к дискретной.

Преобразование может быть выполнено для всех конструктивных групп или только выбранных из списка. Кроме того, в процессе преобразования могут быть учтены требования норм по минимальному проценту армирования. Эти настройки выполняются путем активации соответствующих маркеров.

Количество диапазонов назначается отдельно для каждого вида арматуры и каждой конструктивной группы. Предусмотрена возможность выполнить назначение одновременно всем группам (активен маркер **Количество диапазонов для всех групп принять равными** ...).

Площадь продольной арматуры $\Delta S_i$ рассматриваемой группы армирования, приходящаяся на каждый диапазон, равна

$$\Delta S_i = (S_{i,max} - S_{i,min})/n_i,$$

где

i – вид арматуры (i = 1, 2, 3, 4);

$S_{i,max}$ и $S_{i,min}$ – максимальная и минимальная, соответственно, площади арматуры i-го вида;

$n_i$ – количество диапазонов, назначенное для арматуры i-го вида рассматриваемой группы.

Аналогично определяется площадь поперечной арматуры ($W_x$, $W_y$) рассматриваемой группы армирования, приходящаяся на каждый диапазон.

Поскольку равные диапазоны не всегда обеспечивают рациональное армирование (например, несколько диапазонов могут иметь одинаковое дискретное армирование), в программе предусмотрена возможность изменить в рамках одной группы как количество диапазонов арматуры *i*-го вида, так и площадь диапазонов. Для этого используется диалоговое окно (см. рис. 19.12-2), которое вызывается нажатием кнопки, стоящей справа от имени рассматриваемой группы.

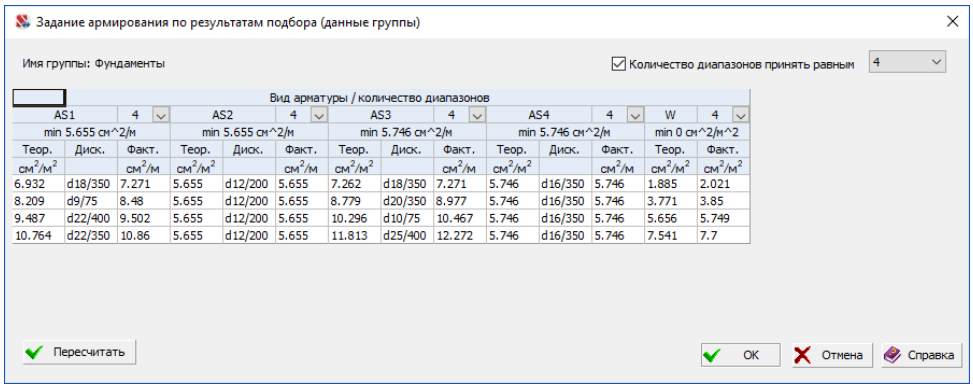



Рис. 19.12-2. *Диалоговое окно* **Задание армирования по результатам подбора (данные группы)**

В этом окне о каждом виде арматуры рассматриваемой конструктивной группы представлена следующая информация:

- количество диапазонов;
- минимальная площадь теоретической (подобранной) арматуры;
- максимальное значение подобранной арматуры для каждого диапазона;
- дискретное (диаметр/шаг) армирование для каждого диапазона;
- фактическая площадь дискретной арматуры для каждого диапазона.

В тех случаях, когда для максимального значения площади арматуры одного или нескольких диапазонов не удалось подобрать дискретное армирование (пару диаметр/шаг), в соответствующих графах таблицы выводится максимальная по площади комбинация диаметр/шаг и фактическая (соответствующая этой комбинации) площадь арматуры. Поиск комбинации диаметр/шаг выполняется исходя из списков допустимых шагов арматуры и диаметров арматуры указанного класса по критерию минимальной площади. При этом учитывается максимально допустимый диаметр, заданный в параметрах рассматриваемой конструктивной группы.

В случае если пользователь изменяет данные, приведенные в таблице окна **Армирование групп** (например, границы диапазонов), фиксация изменений и пересчет выполняются по нажатию кнопки **Пересчитать**.

Значение площади, для которой не удалось подобрать дискретную арматуру, выделяется в таблице красным цветом.

При преобразовании результатов подбора в стержневых элементах конечный элемент разбивается на $n$ участков, где $n$ — число сечений в стержне. Длины первого и последнего (по длине стержня $L$) участков равны $\frac{L}{2(n-1)}$, а длины всех остальных (промежуточных) участков равны $\frac{L}{(n-1)}$. Если число сечений $n > 5$, то программа преобразование не производит (это является ограничением реализации). Разбиение на диапазоны не производится и для каждого конечного элемента создаются участки (в общем случае) с различным армированием.

Отображение цветовой карты заданного армирования пластин выполняется одноименной операцией в разделе **Экспертиза железобетона** —  .

## Графическое представление результатов подбора арматуры в стержневых элементах



Результаты подбора арматуры в стержневых элементах в графическом виде отображаются в виде эпюр площадей продольной и поперечной арматуры. Эпюры могут быть «проволочными» (без заполнения цветом тела эпюры) и их вызов выполняется нажатием на кнопку **Отображение эпюр**

**армирования стержней** —  , а также с использованием цветовых шкал — кнопка **Цветовое отображение эпюр арматуры** —  . Вывод эпюр выполняется для одной конструктивной группы армирования, которая выбирается из списка в разделе инструментальной панели **Подбор арматуры**.

На рисунке 19.12-3 представлен выпадающий список с видами информации, которые могут быть графически визуализированы после выполнения подбора арматуры в стержневых элементах.

Основные правила построения эпюр армирования следующие:

- стержень разбивается на *n* участков, где *n* равно количеству сечений, в которых вычислялись усилия (правила разбиения стержня на участки описано выше);
- если стержень включает жесткие вставки, то в режиме анализа результатов подбора арматуры отображение жестких вставок включается автоматически;
- эпюры строятся для участка стержня только в том случае, если на этом участке подобрана арматура (здесь термин «подобрана» означает, что площадь арматуры $S_i \geq 0$);
- если арматуру (хотя бы по одному направлению) не удалось подобрать, соответствующий участок стержня окрашивается в красный цвет;
- положение арматуры в сечении, обеспечивающее выполнение требований норм по несущей способности, можно увидеть для каждого стержня в отдельности в режиме **Информация об элементе** (кнопка **Арматура**);
- значение площади арматуры отображается на эпюре при нажатии кнопки **Оцифровка** инструментальной панели **Визуализация результатов**. Оцифровку рекомендуется выполнять на «проволочных» эпюрах.

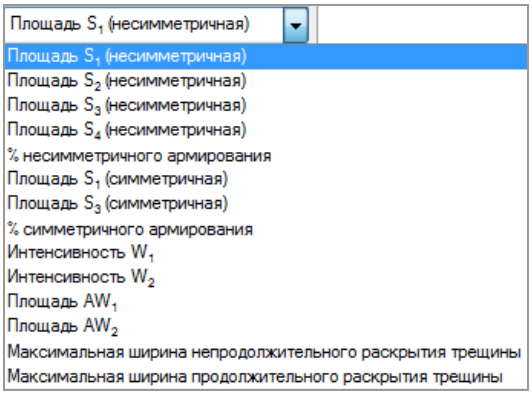



Рис. 19.12-3. *Список результатов подбора арматуры в стержнях*

Эпюры армирования по умолчанию выводятся в плоскости $\mathbf{x_1 0 z_1}$ местной системы координат стержня. Если для стержня был изменен угол ориентации конструктивных осей, то возможно вырождение отображения эпюр на экране. В этом случае можно воспользоваться операцией **Смена оси отображения эпюр**  (эпюры будут выводиться в плоскости $\mathbf{x_1 0 y_1}$).

## Графическое представление результатов подбора арматуры в пластинчатых элементах



Как отмечалось выше, для пластинчатых элементов по умолчанию предусмотрен вывод интенсивности (погонной площади) армирования в виде изополей или цветовых карт (мозаики). Кроме того, для поперечной арматуры возможен вывод площади арматуры при заданном шаге, который выбирается из выпадающего списка инструментальной панели. Для этого предусмотрены операции, использующие цветовые шкалы:

 — **Отображение изополей армирования пластин**. Изополя, относящиеся к соседним интервалам рассматриваемого фактора, не разделяются изолиниями. Используется стандартная

цветовая шкала с возможностью назначения количества и границ интервалов (границы интервалов меняются в диалоговом окне **Настройки**, которое вызывается кнопкой **Настройки цветовой шкалы** — ). Кроме того, окно с цветовой шкалой включает таблицу с характеристиками бетона и арматуры исследуемой конструктивной группы;

— **Отображение изополей и изолиний армирования пластин**. Отображение выполняется по тем же правилам, что в предыдущем случае, но при этом изополя, относящиеся к соседним интервалам рассматриваемого фактора, разделяются изолиниями, цвет которых назначается в разделе **Настройка цветовой схемы** меню ***Настройки***.

— **Отображение цветовой карты результатов армирования**. Этот вид отображения отличается тем, что каждый конечный элемент целиком окрашивается в цвет, соответствующий цвету интервала, в который попало значение рассматриваемого фактора на цветовой шкале. Цветовая шкала и принципы управления ею аналогичны рассмотренным выше.

На рисунке 19.12-4 представлен выпадающий список с видами информации, которые могут быть графически визуализированы после выполнения подбора арматуры в пластинчатых элементах.

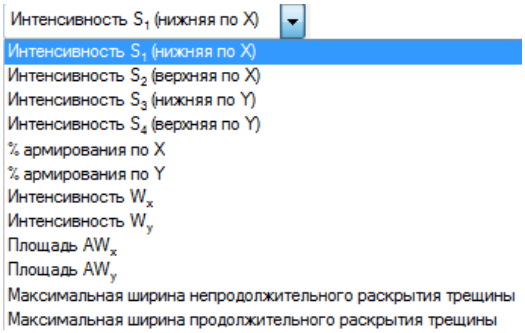



Рис. 19.12-4. *Список результатов подбора арматуры в пластинах*

Кроме интенсивности армирования указанные выше операции и цветовые шкалы используются для визуализации результатов подбора продольной арматуры, представленных в виде наборов арматурных стержней с заданным шагом по направлениям, совпадающим с направлениями выдачи усилий. Для активации этой операции используется кнопка — **Переключение формы выдачи результатов армирования**, а шаг арматуры выбирается из одноименного списка в инструментальной панели. В этом случае при оцифровке данные будут выведены в формате типа *d12/100* (то есть рекомендуется использовать арматуру диаметра 12 мм с шагом 100 мм).

Результаты подбора продольной арматуры могут быть представлены в виде дополнительного армирования сетками или стержнями . В этом случае в левом столбце таблицы цветовой шкалы выводятся следующие данные:

- в первой строке таблицы — диаметр и шаг фонового армирования;
- в последующих строках для каждого интервала записываются диаметр и шаг дополнительного армирования, помеченные знаком «+»; приведенные значения дополнительного армирования для каждого интервала следует рассматривать, как ***дополнение к фоновой арматуре***;
- если при заданном диаметре или шаге арматуры дополнительное армирование подобрать не удалось, то в текущей и последующих строках таблицы выводятся значения интенсивности дополнительного армирования.

В правом столбце каждого интервала записывается значение интенсивности армирования, соответствующее большей границе текущего интервала (именно это значение принималось в расчет при определении дискретного армирования).

В зависимости от того, как выполняется дополнительное армирование (сетками или стержнями), фиксируется шаг или диаметр арматуры. Выбранное значение выводится в окне цветовой шкалы над таблицей.

Настройка шкалы дополнительного армирования выполняется нажатием кнопки  диалогового окна шкалы. При этом появится окно **Настройки** (рис. 19.12-5).

Кнопка **Конструктивное армирование** активирует диалоговое окно (рис. 19.12-6), что позволяет задать в поле ввода интенсивность конструктивной (фоновой арматуры) или выбрать из выпадающего списка нужную комбинацию *Диаметр/Шаг* (при этом соответствующая интенсивность будет автоматически перенесена в поле ввода).

Для каждого интервала также предусмотрены выпадающие списки, из которых можно выбрать величину дополнения к фоновой арматуре.

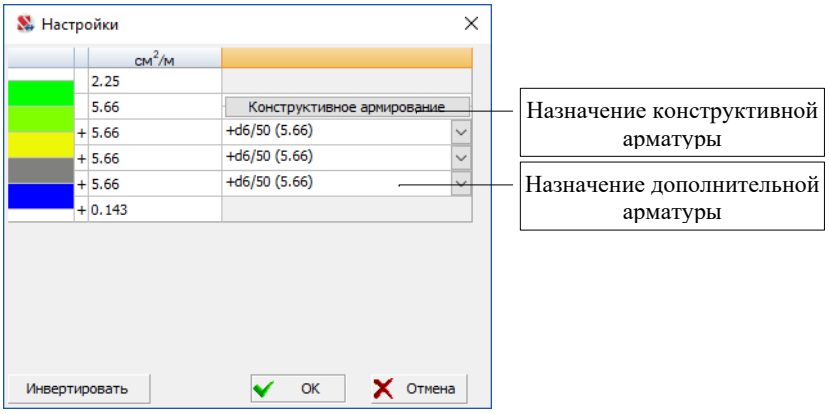



Рис. 19.12-5. *Диалоговое окно* **Настройки** *дополнительного армирования*

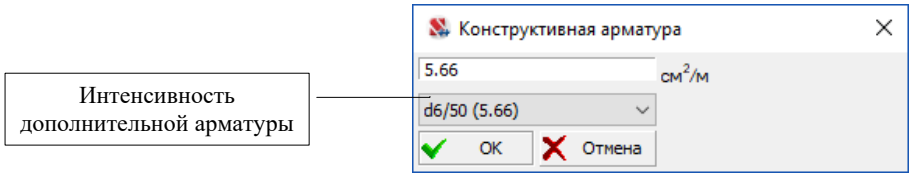



Рис. 19.12-6. *Диалоговое окно* **Конструктивная арматура**

## Экспорт результатов подбора арматуры в плите в конструирующую подсистему программы ALLPLAN



Операция позволяет передать данные о результатах подбора арматуры в элементах фундаментных плит или перекрытий в конструирующую подсистему программы **ALLPLAN**. В результате экспорта формируется файл с расширением **.asf**, в котором содержится информация о геометрии армируемого участка, а также площадях верхней и нижней арматуры (по сортаменту). В него записываются характеристики элементов, входящих в активную группу армирования (если в группе есть селектированные элементы, то экспорт информации будет произведен только для них). Нажатие стрелки дополнительных возможностей позволяет выбрать какие площади следует передавать — вычисленные или вычисленные (по сортаменту).

## Формирование отчета



Активация операции печати таблиц с результатами подбора арматуры приводит к появлению диалогового окна (рис. 19.12-7). Таблицы формируются в формате **.rtf** и автоматически загружаются в текстовый редактор, ассоциированный с этим форматом.

Установленные в данном окне группы маркеров позволяют управлять формированием таблиц, задавая следующие опции:

- **Для всех групп и конструктивных элементов** — вывод результатов для всех групп;

- **Только для указанных групп и конструктивных элементов —** результаты будут выведены только для групп, отмеченных в списке групп;
- **Для указанных элементов** — результаты будут выведены только для конечных элементов, номера которых перечислены в поле ввода;

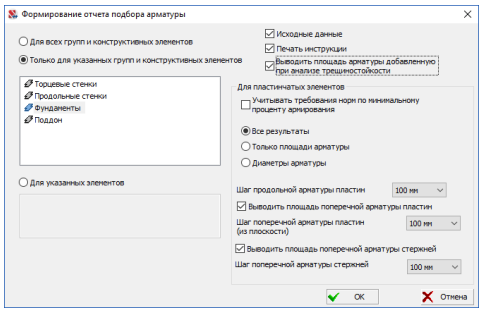



Рис. 19.12-7. *Диалоговое окно* **Формирование отчета подбора арматуры**

- **Печать инструкции** — вывод после таблиц информации с правилами чтения результатов;
- **Выводить площадь арматуры добавленную при анализе трещиностойкости**;
- **Учитывать требования норм по минимальному проценту армирования** — при взведении данного маркера погонная площадь арматуры в пластинах будет (при необходимости) увеличена для удовлетворения требований норм по минимальному проценту армирования;
- **Только площади арматуры** — печать таблиц только со значениями суммарной площади арматуры;
- **Диаметры арматуры** — печать таблиц с данными о диаметрах, шагах и количестве арматурных стержней;
- **Все результаты** — печать таблиц со значениями площадей арматуры, а также данных о диаметрах, шагах и количестве арматурных стержней;
- **Шаг продольной арматуры пластин** — если отчет о результатах подбора арматуры должен включать информацию не только о погонных площадях продольного армирования пластин, но и представление этой информации в формате **Диаметр/Шаг**, то следует выбрать шаг продольного армирования, для которого будут выданы диаметры продольных арматурных стержней;
- **Выводить площадь поперечной арматуры пластин** — если данный маркер не взведен, то данные о подобранной поперечной арматуре в пластинах будут выведены в виде интенсивности (см$^2$/м); в противном случае потребуется выбрать из выпадающего списка **Шаг поперечной арматуры пластин (из плоскости)** и отчет будет содержать требуемую площадь (см$^2$) поперечной арматуры при выбранном шаге;
- **Выводить площадь поперечной арматуры стержней** — если данный маркер не взведен, то данные о подобранной поперечной арматуре в стержнях будут выведены в виде интенсивности (см$^2$/м); в противном случае потребуется выбрать из выпадающего списка **Шаг поперечной арматуры стержней**, и отчет будет содержать требуемую площадь (см$^2$) поперечной арматуры при выбранном шаге.

## 19.13.Чтение результатов подбора арматуры

### Стержневые элементы

В таблице с результатами расчета (таблица 19.13-1) информация для каждого сечения элемента выводится в нескольких строках.

**Результаты подбора арматуры в стержневых элементах** **Таблица 19.13-1**

| № элемента | Сечение | Тип | Продольная арматура площадь в см$^2$ диаметры (∅) в мм шаг (S) в мм | | | | | | | | Ширина раскрытия трещины (мм) | | Поперечная арматура площадь в см$^2$ | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Несимметричная | | | | | Симметричная | | | | | Шаг 50 мм | |
| | | | $S_1$ | $S_2$ | $S_3$ | $S_4$ | % | $S_1$ | $S_3$ | % | непродолжительное | продолжительное | $AW_z$ | $AW_y$ |
| | b = 40 см<br>h = 60 см<br>$a_1$ = 5 см<br>$a_2$ = 5 см | | | | | | | | | | | | | |
| 11 | 1 | Σ | 2,56 | 22,22 | 0,21 | 0,21 | 1,145 | 21,61 | 0,41 | 2,002 | 0,298 | 0,293 | 0,23 | 0,1 |
| | | C | | 6,36 | | | | 5,74 | | | | | | |
| | | ∅ | 2∅14 | 3∅32 | | | | 3∅32 | | | | | | |
| | 2 | Σ | 2,56 | 12,54 | 0,21 | 0,21 | 0,705 | 10,66 | 0,41 | 1,006 | | | 0,1 | 0,1 |
| | | C | | 2,9 | | | | 1,01 | | | | | | |
| | | ∅ | 2∅14 | 3∅25 | | | | 2∅28 | | | | | | |
| | 3 | Σ | 2,56 | 5,09 | 0,21 | 0,21 | 0,366 | 5,09 | 0,41 | 0,5 | | | 0,1 | 0,1 |
| | | ∅ | 2∅14 | 3∅16 | | | | 3∅16 | | | | | | |

Для групп армирования стержневых элементов в таблице с результатами расчета информация для каждого элемента (или унифицированной группы элементов) выводится в нескольких строках. В столбце ***Тип*** каждой строки размещаются следующие символы, указывающие на тип данных, помещенных в строку:

**Σ** — площадь арматуры;

**T** — площадь арматуры, необходимая для восприятия действия крутящего момента (входит в Σ);

**C** — площадь арматуры, добавленная для обеспечения трещиностойкости (входит в **Σ**);

**∅** — представление подобранной площади арматуры в дискретном виде.

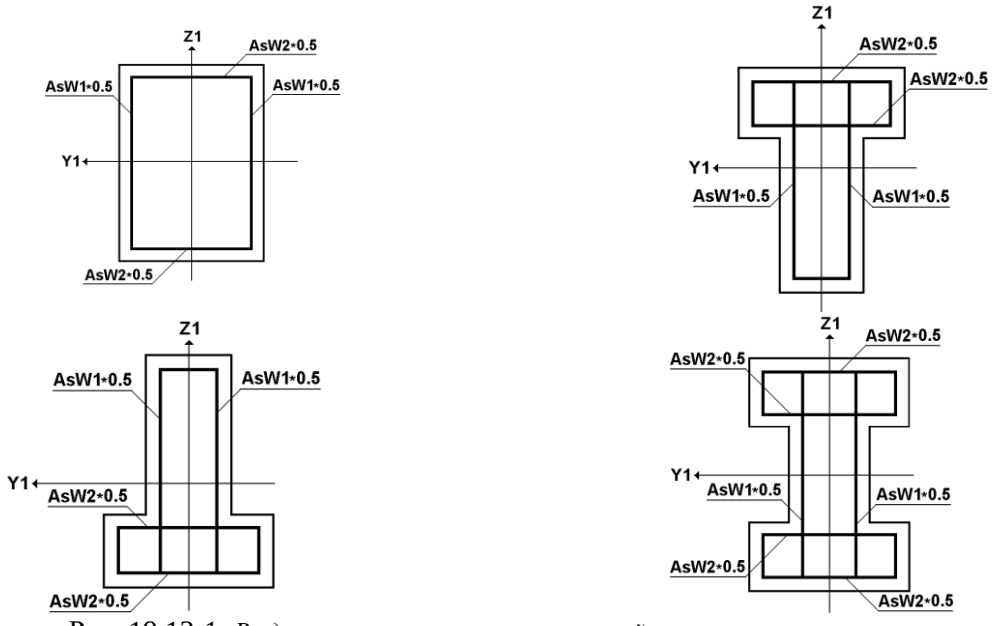



Рис. 19.13-1. *Выдача результатов по поперечной арматуре в стержнях*

В строках, пиктограммы которых включают символ ∅, результаты представлены в виде N∅D, где N — количество стержней, D — диаметр одного стержня. Если сортамент диаметров арматуры исчерпан, то в соответствующих позициях таблицы выводится N∅A, где N — количество стержней, A — площадь сечения одного стержня.

Если расчеты на трещиностойкость не выполнялись или арматура, подобранная по прочности, обеспечивает трещиностойкость сечения, то строки, помеченные пиктограммой **C**, не выводятся.

Если форма сечения такова, что может быть реализовано как симметричное, так и несимметричное армирование, то отчет содержит информацию о двух вариантах расчета.

Для поперечной арматуры приводится также максимальный шаг хомутов.

В результатах расчета величина площади поперечной арматуры, воспринимающей действие крутящего момента, печатается вычисленной для двух стержней, расположенных в сечении элемента. Таким образом, площадь одного стержня можно определить как *AW*/2.

### Пластинчатые элементы

Для групп армирования пластинчатых элементов в таблице с результатами расчета информация для каждого элемента (или унифицированной группы элементов) выводится в нескольких строках. В столбце ***Тип*** каждой строки размещаются следующие символы, указывающие на тип данных, помещенных в строку:

**∑** — площадь арматуры на один погонный метр;

**C** — площадь арматуры на один погонный метр добавленная для обеспечения трещиностойкости (входит в **∑**);

**∅/S** — представление подобранной арматуры в виде набора диаметров и шагов арматуры.

Если расчет по трещиностойкости не проводится или арматура, подобранная по первому предельному состоянию, обеспечила требуемую трещиностойкость, то строки с типом **C** не выводятся.

Площадь сечения арматуры для каждого пластинчатого конечного элемента (или унифицированной группы конечных элементов), определяется для сечения шириной 1 м при заданной толщине элемента в соответствии с расчетными сочетаниями усилий.

В строках с типом **∅/S** результаты представлены в виде ***∅D/S***, где ***D*** — диаметр одного стержня, ***S*** —шаг стержней в миллиметрах. Если сортамент диаметров арматуры исчерпан для заданного шага, то в соответствующих позициях таблицы выводится значение площади арматуры.

Погонная интенсивность подобранного поперечного армирования выводится при шаге из плоскости равным 100 мм.

**Таблица 19.13-2**

**Результаты подбора арматуры в пластинчатых элементах**

| № элемента | Тип | Продольная арматура интенсивность в см²/м диаметры (∅) в мм шаг (S) в мм | | | | | | Ширина раскрытия трещины (мм) | | Поперечная арматура площадь в см² диаметры (∅) в мм | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | По X | | | По Y | | | | | Шаг из плоскости 100 мм | |
| | | $S_1$ | $S_2$ | % | $S_3$ | $S_4$ | % | непродолжительное | продолжительное | $AW_x$ | $AW_y$ |
| 9250 | ∑ | 12,04 | 12,72 | 0,583 | 3,4 | 21,55 | 0,554 | 0,298 | 0,298 | | 1,01 |
| | ∅/S | 12,04 | 12,72 | 0,599 | ∅7/100 | 21,55 | 0,586 | | | | ∅10/75 |
| | C | 0,36 | | | | | | | | | |

## 19.14.Экспертиза заданного армирования

Экспертиза несущей способности конструктивных элементов и/или групп конструктивных элементов выполняется нажатием кнопки **Расчет** —  . Данная кнопка содержит стрелку дополнительных возможностей, которая позволяет, кроме полного расчета для всех конструктивных групп, выполнить экспертизу только для тех групп, в которые вносились изменения, произвести расчет только выбранных пользователем групп (в этом случае появится диалоговое окно со списком групп, и пользователь должен произвести выбор), активировать операции контроля данных (без проведения расчета), просмотр сообщений, которые выводились при предыдущем расчете или контроле, и удаление результатов. Независимо от того, вносились ли изменения во все конструктивные группы, или только в часть из них, контроль исходных данных выполняется для всех групп и, соответственно, диагностические сообщения будут выданы для всех групп, а не только для тех, которые пересчитывались. Проверка выполняется для всех сечений конечных элементов, входящих в конструктивный элемент или группу конструктивных элементов на основании *заданного* армирования. Заданное армирование может быть получено путем

преобразования арматуры, подобранной в результате работы программы (см. выше описание операции  ), или назначено пользователем. В последнем случае используются операции **Задание схемы армирования пластинчатых элементов** и **Задание схемы армирования стержней**. Для их выполнения необходимо, чтобы элементы входили в конструктивные группы, т. к. все остальные данные, используемые при выполнении экспертизы (класс бетона и арматуры, расстояние до центра тяжести арматуры и т. п.), берутся из описания конструктивных групп, которым принадлежат элементы.

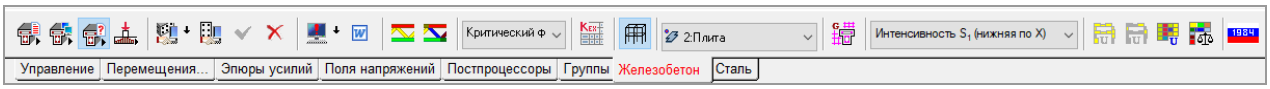



Рис. 19.14-1. *Инструментальная панель для расчета несущей способности железобетонных элементов и анализа результатов*

Инструментальная панель (рис. 19.14-1) включает кнопки для вызова следующих операций:

 — задание схемы армирования пластинчатых элементов;

 — задание схемы армирования стержней;

 — ввод данных и сохранение активной группы;

 — сброс выбранной группы;

 — активация расчета (экспертиза);

 — формирование отчета;

 — визуализация результатов проверки на схеме (3-х цветная шкала);

 — визуализация результатов проверки на схеме (полноцветная шкала);

 — экстремальные значения факторов;

 — отображение расчетной схемы;

 — визуализация активной группы (здесь как в изображении пиктограммы, так и на схеме используется фиолетовый цвет, в отличие от кнопки выбора группы, где использован — красный);

 — отображение эпюр заданного армирования;

 — цветовое отображение эпюр заданного армирования;

 — отображение цветовой карты заданного армирования пластин;

 — вес заданной арматуры;

 — индикация норм проектирования.

Результатом экспертизы является наибольшее значение каждого фактора, определяющего несущую способность элемента.

## Задание схемы армирования пластинчатых элементов



При активации данной операции появляется диалоговое окно **Армирование пластин** (рис. 19.14-2), в котором задается схема армирования пластинчатых элементов. Диаметр арматуры выбирается из выпадающего списка, шаг продольной и поперечной арматур вводится в

одноименной строке. Отсутствие арматуры определенного вида отмечается активным маркером в одноименной строке.

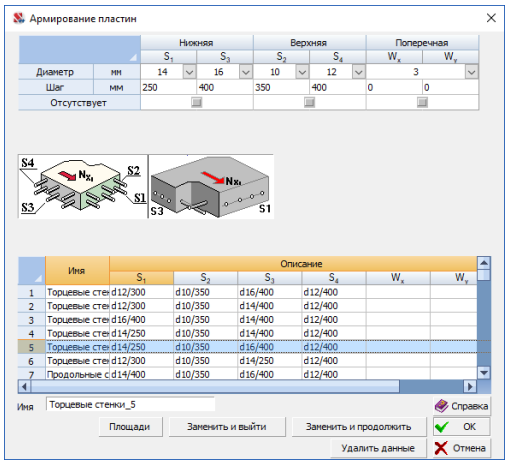



Рис. 19.14-2. *Диалоговое окно* **Армирование пластин**

Если армирование каких-либо элементов было задано ранее или получено путем автоматического преобразования результатов подбора, то в таблице вариантов армирования будут представлены все использованные схемы. В этом случае назначение может быть выполнено путем выбора схемы армирования из таблицы (данные отмеченной строки переносятся в соответствующие поля таблицы ввода данных в верхней части окна). Работа с этими данными аналогична работе, например, с характеристиками жесткости, т. е. выход из окна по кнопке **OK** без изменения содержания таблицы ввода означает, что выбранным на схеме элементам будет назначена ранее использованная схема армирования. Если в таблицу ввода внесены изменения и использованы кнопки **Заменить и выйти** или **Заменить и продолжить**, то изменения коснутся только указанных схем и соответствующих им элементов. И, наконец, если после изменения ранее использованной схемы армирования выйти из окна по кнопке **ОК**, то выбранным элементам будет назначена измененная схема армирования.

Для назначения заданного армирования элементам схемы следует после выхода из диалогового окна по кнопке **OK** выбрать на схеме элементы и нажать кнопку **OK** —  в инструментальной панели.

Если использовать кнопку **Удалить данные**, то для выбранных элементов информация о заданном армировании будет удалена.

Кнопка **Площади** в диалоговом окне **Армирование пластин** позволяет получить информацию о погонных площадях арматуры, которые соответствуют назначенным диаметрам и шагам (рис. 19.14-3).

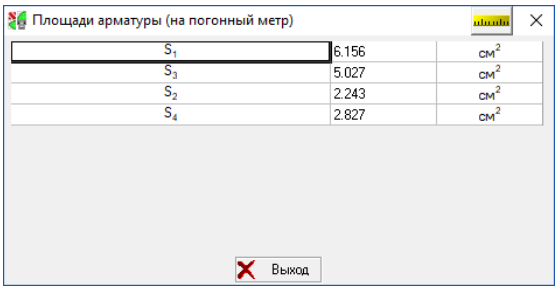



Рис. 19.14-3. *Диалоговое окно* **Площади арматуры**

В операции **Задание схемы армирования пластинчатых элементов** предусмотрено два вида действий — собственно задание схемы и ее редактирование. Выбор действия выполняется в меню, которое вызывается нажатием стрелки дополнительных возможностей, стоящей справа от кнопки вызова операции.

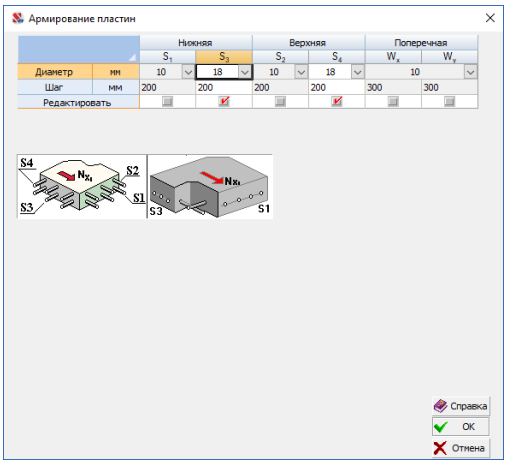



Рис. 19.14-4. *Редактирование схемы армирования*

Редактирование схемы армирования предусматривает возможность замены в выбранных элементах ранее заданных значений диаметра и/или шага только указанных видов арматуры. Остальные параметры армирования остаются без изменений.

Для выполнения операции следует:

- нажатием стрелки дополнительных возможностей вызвать меню операции **Задание схемы армирования пластинчатых элементов** и выбрать в нем раздел **Редактирование схемы армирования …**;
- в появившемся диалоговом окне **Армирование пластин** (рис. 19.14-2) с помощью маркеров указать, какие виды арматуры будут редактироваться;
- задать необходимые данные в соответствующих графах таблицы армирования и нажать кнопку **OK**;
- выбрать на схеме элементы, в которых меняется схема армирования, и нажать кнопку **Подтверждение** в инструментальной панели.

В выбранных элементах будет выполнена замена указанной арматуры.

## Задание схемы армирования стержневых элементов



При активации данной операции появляется диалоговое окно (рис. 19.14-5), в котором задается армирование участков стержневых элементов. Число участков выбирается в одноименном выпадающем списке и может не совпадать с количеством сечений, для которых сформированы РСУ. В любом случае, экспертиза армирования каждого элемента будет выполнена с учетом всех, полученных для него РСУ.

Длины участков назначаются в процентах от длины элемента. Схема армирования каждого участка задается диаметром арматуры и количеством стержней данного диаметра для нижней, верхней и боковой арматуры.

Наличие того или иного вида арматуры в элементе назначается путем активации соответствующих маркеров и принимается одинаковым для всех участков. В тех случаях, когда какой-либо вид арматуры отсутствует, например, второй ряд верхней арматуры в центральном участке элемента, количество арматурных стержней этого вида принимается равным нулю.

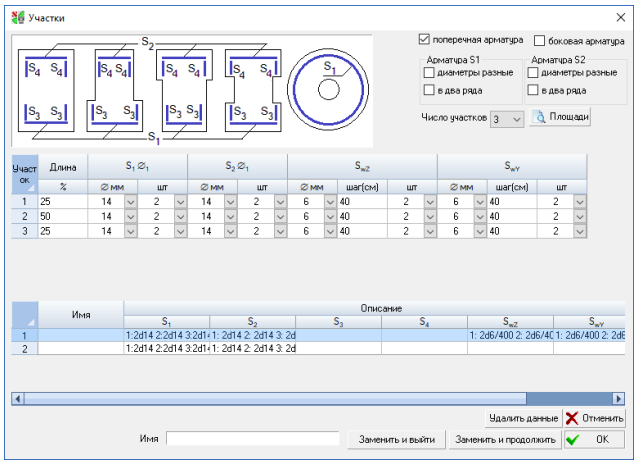



Рис. 19.14-5. *Диалоговое окно* **Участки**

Если активен маркер **Арматура в два ряда**, то появляется таблица **Продольная арматура (второй ряд)**. В ней задаются диаметр и количество стержней нижней и верхней продольной арматуры, установленной во втором ряду, а также расстояние в свету между первым и вторым рядами нижней ($\Delta_1$) и верхней ($\Delta_2$) арматуры. Если расстояние в свету задано равным нулю, то программа принимает это расстояние равным конструктивному минимальному расстоянию для стержней, которые при бетонировании занимают вертикальное положение.



**Ограничение реализации**

Для круглых и кольцевых сечений второй ряд армирования игнорируется.

Если армирование каких-либо элементов было задано ранее или получено путем автоматического преобразования результатов подбора, то в таблице вариантов армирования будут представлены все использованные схемы. В этом случае назначение может быть выполнено путем выбора схемы армирования из таблицы (данные отмеченной строки переносятся в соответствующие поля таблицы ввода данных в верхней части окна). Работа с этими данными аналогична работе, например, с характеристиками жесткости, т. е. выход из окна по кнопке **OK** без изменения содержания таблицы ввода означает, что выбранным на схеме элементам будет назначена ранее использованная схема армирования. Если в таблицу ввода внесены изменения и использованы кнопки **Заменить и выйти** или **Заменить и продолжить**, то изменения коснутся только указанных схем и соответствующих им элементов. И, наконец, если после изменения ранее использованной схемы армирования выйти из окна по кнопке **ОК**, то выбранным элементам будет назначена измененная схема армирования.

Запись в графе таблицы, например, S1 вида — **1: 2d20 2:3d22 3:2d14** означает, что для данного стержня нижняя арматура S1 задана для участка 1 как 2 стержня диаметром 20 мм, для участка 2 — 3 стержня диаметром 22 мм и для участка 3 — два стержня диаметром 14 мм.

Для назначения заданного армирования элементам схемы следует после выхода из диалогового окна по кнопке **OK** выбрать на схеме элементы и нажать кнопку **OK** —  в инструментальной панели.

Если использовать кнопку **Удалить данные**, то для выбранных элементов информация о заданном армировании будет удалена.

Для получения информации о площадях арматуры различного вида, которая задана на каждом из участков стержня, следует использовать кнопку **Площади**. В открывшемся при этом диалоговом окне **Площади арматуры** (рис. 19.14-6) приводятся данные о площадях арматуры, а также схема армирования для каждого участка стержня. Поскольку выбранный в таблице диалогового окна **Участки** вариант армирования может принадлежать стержням с разным сечением, то распределение арматурных стержней в сечениях элемента приводится для сечения с условными

размерами и формой, выбранной из набора форм сечений в нижней части окна. Аналогичная информация, но с учетом реального сечения элемента доступна из информации об элементе.

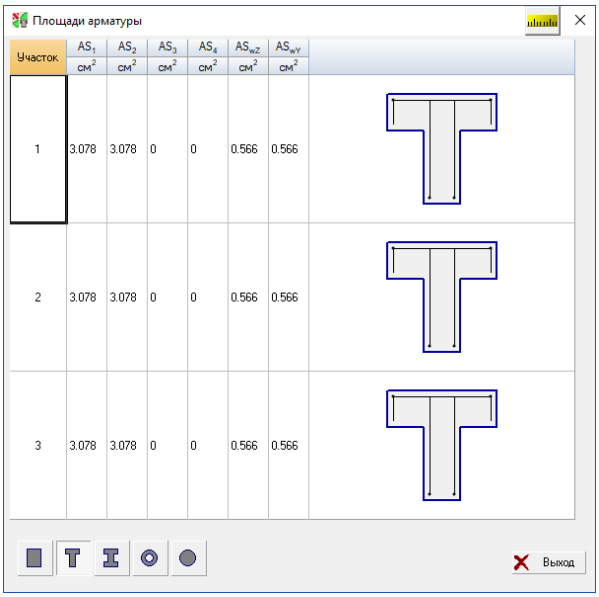



Рис. 19.14-6. *Диалоговое окно* **Площади арматуры**

## Графическое представление заданного армирования в стержневых элементах



Заданное армирование в стержневых элементах в графическом виде отображаются в виде эпюр площадей продольной и поперечной арматуры. Эпюры могут быть «проволочными» (без заполнения цветом тела эпюры), и их вызов выполняется нажатием на кнопку **Отображение эпюр заданного армирования стержней** —  , а также с использованием цветовых шкал — кнопка **Цветовое отображение эпюр заданной арматуры** —  . Вывод эпюр выполняется для активной конструктивной группы, выбранной из списка в инструментальной панели, и того вида арматуры, который указал пользователь. Отображение аналогично отображению эпюр по результатам подбора арматуры, описанному выше.

## Отображение цветовой карты заданного армирования в пластинчатых элементах



Цветовая карта отображения заданного армирования пластин выводится аналогично карте с результатами подбора арматуры.

## Отображение результатов экспертизы



Результаты проверки несущей способности представлены в виде коэффициентов использования ограничений и могут отображаться на схеме одновременно для всех конструктивных групп.

Предусмотрены два вида отображения результатов проверки — в виде трехцветной и полноцветной шкалы. В первом случае для отображения используется операция **Отображение результатов проверки на схеме (3-х цветная шкала)** —  , при выполнении которой элементы, входящие в конструктивные группы, окрашиваются в три цвета:

- зеленый — несущая способность обеспечена;
- красный — несущая способность недостаточна;
- желтый — значение коэффициента ограничений находится вблизи критического значения (фактор близок к 1,0).

Критический диапазон задается путем настройки цветовой шкалы в диалоговом окне **Настройки**, которое вызывается нажатием одноименной кнопки —  .

Например, если в диалоге (рис. 19.14-7) задать величину 0,03, то все элементы с величиной фактора меньше 0.97 будут окрашены в зеленый цвет, при факторе больше 1,03 — в красный, а в том случае, когда фактор находится в диапазоне [0,97;1,03] — будет использован желтый цвет.

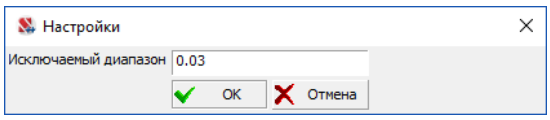



Рис. 19.14-7. *Диалоговое окно* **Настройки**

При использовании режима отображения в виде полноцветной шкалы (кнопка **Отображение результатов проверки на схеме (полноцветная шкала)** —  ) появится обычная цветовая шкала с настраиваемым количеством цветов.

Если в выпадающем списке не выбрана ни одна группа конструктивных элементов, то производится визуализация критического фактора $K_{max}$. Если выбрана конкретная группа, то в списке факторов появится полный перечень произведенных проверок и на схеме можно отобразить результаты проверки по каждому из факторов, определяющих несущую способность объектов проверки (например, прочности или ширины раскрытия трещин). Значения выбранного фактора можно вывести на схему, воспользовавшись кнопкой фильтров **Оцифровка** —  .

## Экстремальные значения факторов



Данная операция позволяет для выбранной группы конструктивных элементов или конструктивного элемента сформировать таблицу (рис. 19.14-8), включающую следующую информацию:

- список факторов;
- минимальное и максимальное значение каждого фактора;
- номера конечных элементов, на которых реализовались значения минимума и максимума.

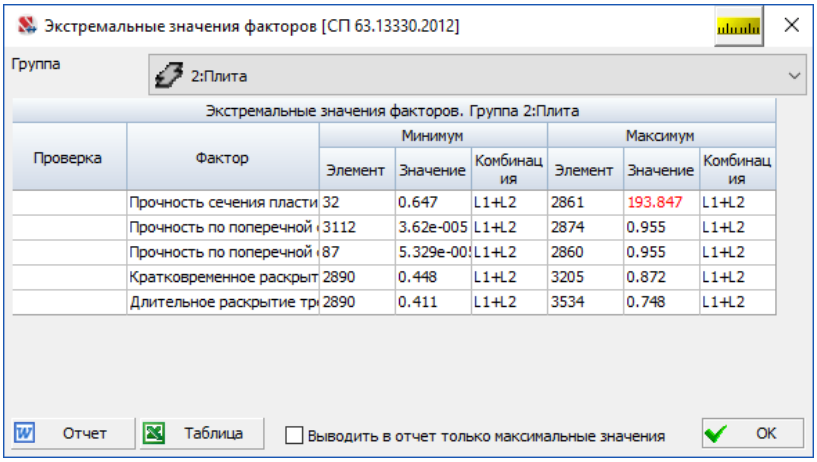



Рис. 19.14-8. *Диалоговое окно*
**Экстремальные значения факторов**

Выбор группы или конструктивного элемента выполняется из списка, расположенного в верхней части диалогового окна. Кнопки **Отчет** и **Таблица** активируют создание отчетных документов в соответствующих форматах для выбранной группы. Специальный маркер позволяет получить отчет, в котором содержатся только максимальные значения факторов.

### Формирование отчета



По результатам экспертизы можно сформировать отчет. Он формируется в формате **RTF** и автоматически загружается в ассоциированное с этим форматом приложение (например, MS Word или WordPad). Перед формированием отчета появляется диалоговое окно (рис. 19.14-9), в котором следует выбрать конструктивные элементы и/или группы конструктивных элементов, информация по которым должна попасть в отчет.

В окне предусмотрены следующие опции управления выводом:

- **Для всех групп и конструктивных элементов** — в отчет попадут все конструктивные группы из списка;
- **Только для указанных групп и конструктивных элементов** — в отчете будет информация только об отмеченных в списке группах;
- **Для указанных элементов** — в этом случае в поле ввода нужно ввести номера конечных элементов, для которых следует сформировать отчет.

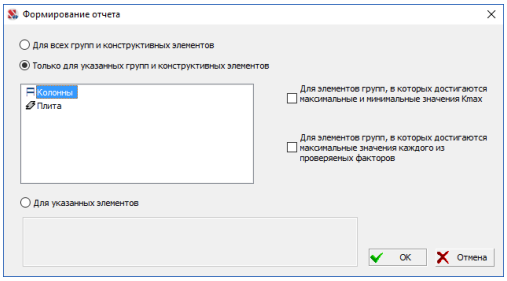



Рис. 19.14-9. *Диалоговое окно*
**Формирование отчета**

Кроме того, маркеры **Для элементов групп, в которых достигаются максимальные и минимальные значения $K_{max}$** и **Для элементов групп, в которых достигаются максимальные значения каждого из проверяемых факторов** позволяют получить отчет только для элементов, в которых факторы достигают максимума.

### Информация об элементе – анализ железобетонных конструкций

Дополнительные возможности для анализа несущей способности элементов железобетонных конструкций, входящих в состав конструктивных групп, предоставляют операции **Заданное армирование**, **Арматура**, **Железобетон экспертиза** и **Железобетон подбор**, которые вызываются из диалогового окна **Информация об элементе** (кнопка  на панели фильтров). Эти операции реализованы по тем же правилам, что и соответствующие операции программы **АРБАТ** [6];

**Заданное армирование** — в диалоговом окне задается армирование анализируемого элемента по правилам, описанным в текущей главе в разделах **Задание схемы армирования пластинчатых элементов** и **Задание схемы армирования стержневых элементов**. При выполнении экспертизы именно эти данные будут приниматься в расчет при анализе несущей способности данного элемента;

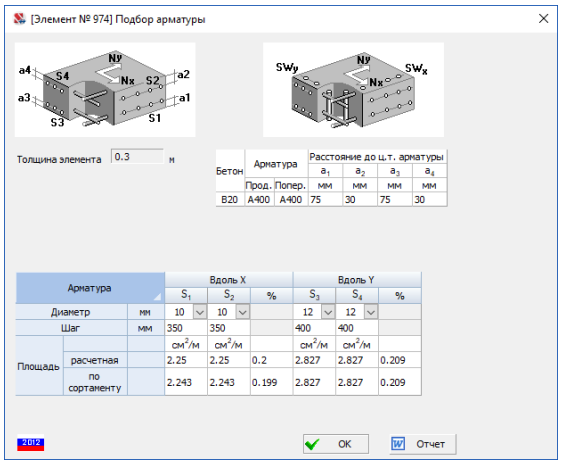



Рис. 19.14-10. *Диалоговое окно* **Подбор арматуры** для пластинчатых элементов

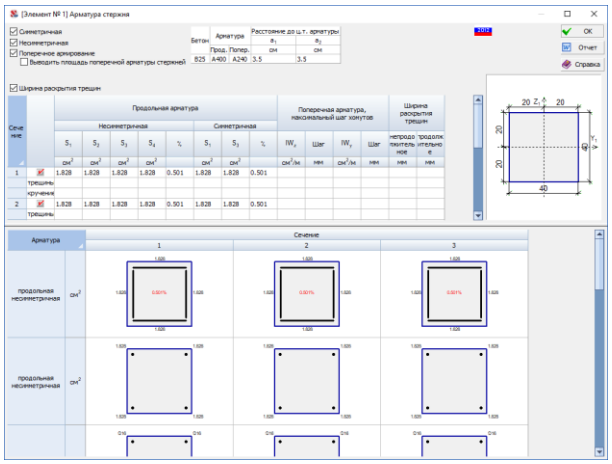


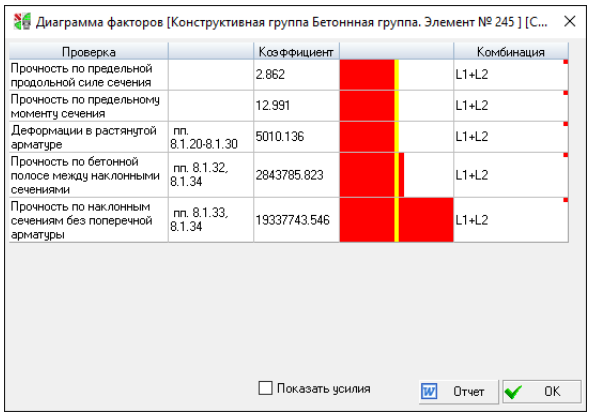

Рис. 19.14-11. *Диалоговое окно* **Арматура стержня** для стержневых элементов

**Арматура** — в диалоговых окнах **Подбор арматуры** представлены результаты подбора арматуры в анализируемом элементе для пластин (рис. 19.14-10) и стержней (рис. 19.14-11);

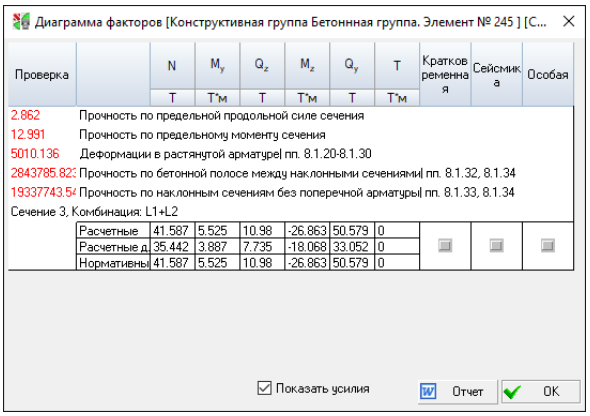
**Железобетон экспертиза** — выполняется операция аналогичная операции **Сопротивление сечений** программы **АРБАТ**. Исходные данные для выполнения экспертизы включают информацию о конечном элементе (геометрические параметры и др.), а также параметры конструктивной группы, в которую входит анализируемый элемент. Усилия и напряжения на одноименной странице соответствуют РСУ этого элемента (если сочетание включает особое (несейсмическое) загружение, то нормативные и нормативные длительные усилия/напряжения будут автоматически приняты равными нулю, поскольку расчет по второму предельному состоянию в этом случае выполнять не следует). Если стержневой элемент является частью конструктивного элемента, то в качестве длины будет передана длина конструктивного элемента. Если выбран стержневой элемент, заданное армирование которого различно на различных участках, то при нажатии кнопки появится меню, в котором следует выбрать нужный участок. В процессе экспертизы допускается изменение различных параметров, например, коэффициента условий работы, класса бетона и арматуры и др., что позволяет проанализировать их влияние на несущую способность элемента. Для стержневых элементов на странице *Армирование* предусмотрена кнопка  , которая позволяет установленное на данной странице армирование сохранить в качестве *заданного* для выбранного элемента (при этом потребуется задать имя заданного армирования). Заданное армирование будет установлено для всего элемента (то есть предполагается, что участок один и армирование одинаково на всем элементе). Другая кнопка  предназначена для выбора одного из ранее определенных вариантов заданного армирования (список вариантов ограничен набором, который использовался для стержней с одним участком армирования и с тем же типом жесткости, что и выбранного элемента);

**Железобетон подбор** — подбор арматуры в анализируемом элементе путем вызова программ подбора арматуры. Здесь, как и в случае экспертизы, допускается изменение различных параметров;

**Железобетон факторы** — для анализируемого элемента выполняется построение диаграммы факторов, включающей все, полученные по результатам экспертизы, значения коэффициентов использования ограничений (рис. 19.14-12,*а*). Маркер **Показать усилия** позволяет получить альтернативное представление информации, при котором будут показаны усилия/напряжения в элементе (рис. 19.14-12,*б*).




*а*)




*б*)

Рис. 19.14-12. *Диалоговое окно*
**Диаграмма факторов**

Кнопка  активизирует диалоговое окно, в котором приведены имена загружений.

## Фильтр Заданное армирование



Для цветового отображения заданного армирования в виде дискретной арматуры используется одноименный фильтр на панели фильтров отображения. Информация в цветовой шкале представлена в следующем виде:

- продольное армирование стержней — $\boldsymbol{S_k = nd}$ или $\boldsymbol{n_1d_1 + n_2d_2}$ — в случае армирования в два ряда (только для арматуры S1 и S2),
  где: $S_k$ – вид арматуры в сечении (k = 1, 2, 3, 4),
  n – количество стержней арматуры данного вида при армировании в один ряд,
  $n_1$ и $n_2$ — количество стержней арматуры данного вида в первом (ближнем к защитному слою) и втором рядах арматуры соответственно,
  d – диаметр арматурных стержней при армировании в один ряд,
  $d_1$ и $d_2$ - диаметр арматурных стержней при армировании в два ряда;

- поперечное армирование стержней — $\boldsymbol{Swz(y) = nd/s}$,

где: Swz(y) – поперечная арматура вдоль соответствующей оси,
n – количество стержней арматуры,
d – диаметр арматурных стержней,
s – шаг хомутов.

Например, запись S1 = 3d16, S2 = 3d32, S3 = 2d12, S4 = 2d12, Swz = 2d12/125, Swy = 2d12/200 для прямоугольного сечения означает, что в рассматриваемом сечении:
нижняя арматура — 3 стержня диаметром 16 мм,
верхняя арматура — 3 стержня диаметром 32 мм,
боковая арматура — по 2 стержня диаметром 12 мм вдоль каждой боковой грани,
поперечная арматура (хомуты) вдоль оси $Z_1$ — два стержня диаметром 12 мм с шагом следования хомутов 125 мм,
поперечная арматура (хомуты) вдоль оси $Y_1$ — два стержня диаметром 12 мм с шагом следования хомутов 200 мм.

- продольное армирование пластин — $\boldsymbol{S_k = nd}$,

где: $S_k$ – вид арматуры в сечении (k = 1, 2, 3, 4),
n – количество стержней арматуры данного вида,
d – диаметр арматурных стержней,

- поперечное армирование пластин — $\boldsymbol{W_{x(y)} = d/s}$,

где: $W_{x(y)}$ – поперечная арматура вдоль соответствующей оси,

d – диаметр арматурных стержней,

s – шаг в соответствующем направлении.

Например, запись S1 = d16/100, S2 = d32/150, S3 = d12/100, S4 = d12/200, Wx = d12/100, Wy = d12/150 означает:

нижняя арматура вдоль оси X направления выдачи усилий — стержни диаметром 16 мм с шагом 100 мм,

верхняя арматура вдоль оси X направления выдачи усилий — стержни диаметром 32 мм с шагом 150 мм,

нижняя арматура вдоль оси Y направления выдачи усилий — стержни диаметром 12 мм с шагом 100 мм,

верхняя арматура вдоль оси Y направления выдачи усилий — стержни диаметром 12 мм с шагом 200 мм,

поперечная арматура вдоль оси X направления выдачи усилий — стержни диаметром 12 мм с шагом 100 мм,

поперечная арматура вдоль оси Y направления выдачи усилий — стержни диаметром 12 мм с шагом 150 мм.

Переключение цветовой шкалы для отображения заданного армирования стержней или пластин выполняется соответствующими кнопками.

## 19.15.Вес заданной арматуры



Данная операция позволяет получить информацию о расходе бетона и заданной арматуры (продольной и поперечной) для каждой конструктивной группы (рис. 19.15-1). Кроме того, приводятся данные о расходе арматуры на единицу объема и единицу площади (для групп пластинчатых элементов), суммарной длине гибких частей стержневых конечных элементов и числе элементов в группах. Кнопка **Отчет** активирует создание отчетного документа.

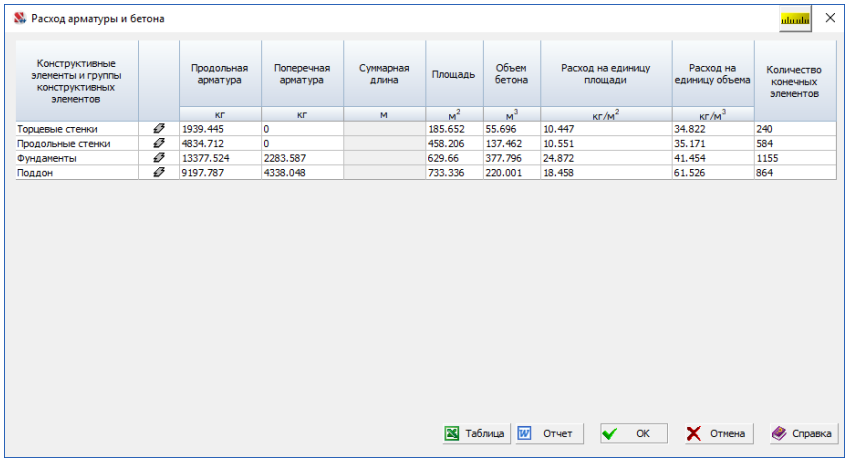



Рис. 19.15-1. *Диалоговое окно* **Расход арматуры и бетона**

## 19.16.Основные принципы подбора арматуры в конечных элементах плиты и оболочки

### Выбор типа армирования

Следуя [3], в первую очередь рассмотрим условия возможного образования трещин в плите, которые свидетельствуют о необходимости постановки той или иной арматуры. Анализ выполняется на примере изучения работы некоторых малых в плане характерных элементов с трещинами, выделяемых из конструкции. Ввиду того, что при этом принципиальных различий между характером работы малого элемента плиты и оболочки не существует (на малом участке кривизна оболочки не сказывается), мы будем рассматривать плоские пластины, воспринимающие как изгибную, так и мембранную группу усилий, т. е. рассматривается совместное действие на элементы всех трех моментов (изгибающих и крутящих) и трех сил (нормальных и касательных).

Рассматриваемые элементы считаем такими, что можно пренебречь влиянием поперечных сил на их деформативность и прочность как до, так и после появления трещин. В силу этой гипотезы рассматриваемые плиты относятся к категории тонких плит. Если каким-то способом установлено, что имеется возможность пренебречь действием поперечных сил, то полученные выводы можно распространять и на пластины средней толщины.

Характер деформирования железобетонных пространственных конструкций в областях с трещинами зависит от схемы трещин, т. е. ориентации трещин относительно направлений армирования, взаимного пересечения трещин, возникновения трещин на одной или обеих поверхностях элемента, характера прохождения трещин по толщине элемента (сквозные или несквозные трещины). Сквозные трещины встречаются при безмоментном напряженном состоянии (в элементах находящихся в плоском напряженно-деформированном состоянии типа балок-стенок) или при дополнительном действии небольших моментов. Предполагается, что трещины нормальны к срединной поверхности элементов.

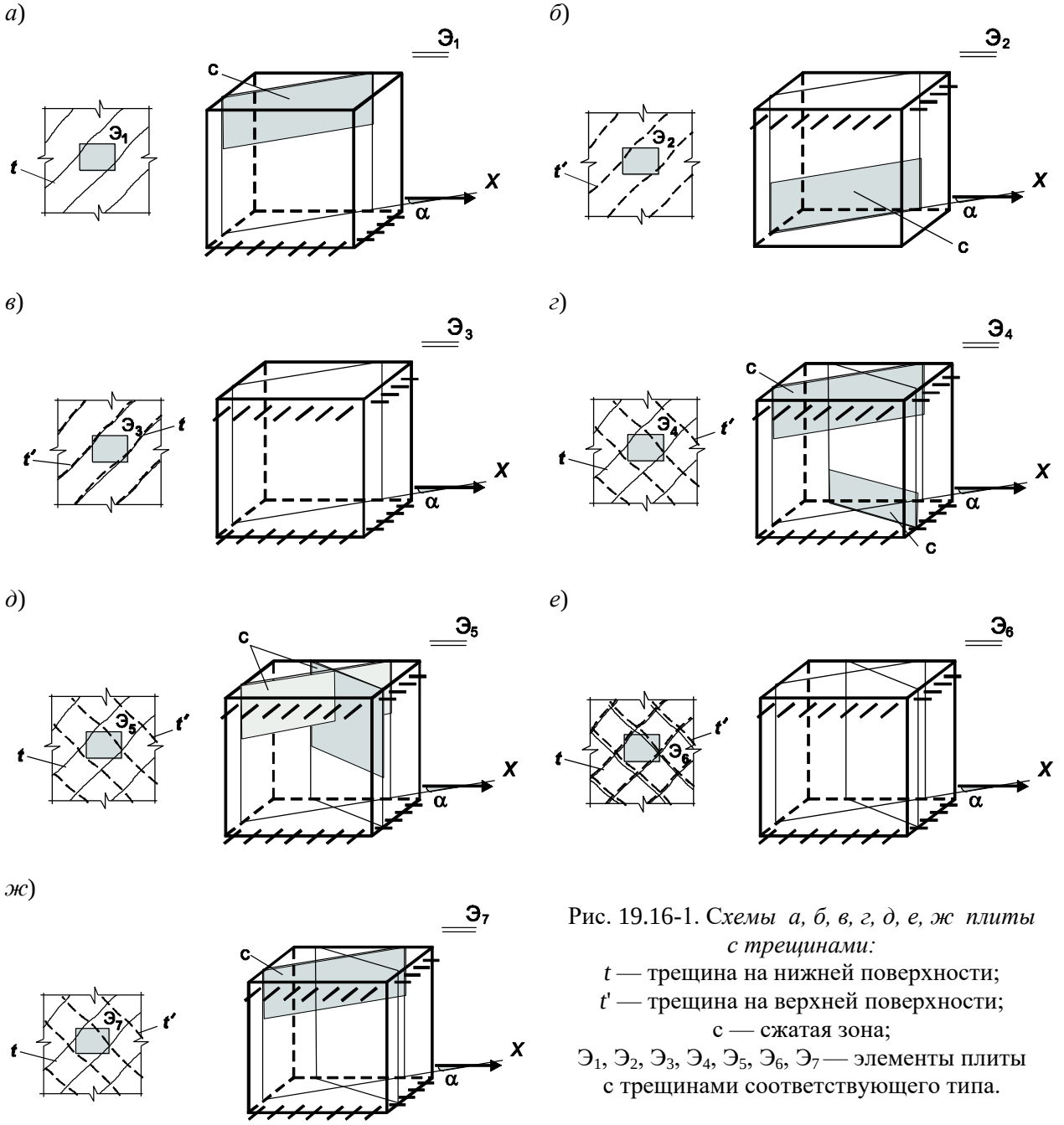



Рис. 19.16-1. С*хемы а, б, в, г, д, е, ж плиты с трещинами:*
*t* — трещина на нижней поверхности;
*t*' — трещина на верхней поверхности;
с — сжатая зона;
$Э_1$, $Э_2$, $Э_3$, $Э_4$, $Э_5$, $Э_6$, $Э_7$ — элементы плиты с трещинами соответствующего типа.

Разнообразие трещин в элементах можно свести к семи схемам (рис. 19.16-1):

1. Непересекающиеся трещины проходят на одной из поверхностей: нижней (рис. 19.16-1, *а*) или верхней (рис. 19.16-1, *б*); при этом в элементах имеется растянутая зона с трещинами и сжатая зона без трещин (элементы $Э_1$ и $Э_2$).
2. Элемент пронизан непересекающимися сквозными трещинами (рис. 19.16-1, *в*).
3. Трещины разных направлений имеются одновременно на нижней и верхней поверхностях элемента (рис. 19.16-1, *г*). Они часто встречаются в угловых зонах плит, где действуют большие крутящие моменты. В верхней и нижней зонах имеются полосы бетона между трещинами, воспринимающие силы сжатия (они представляют своеобразный тип «сжатых зон», пронизанных трещинами).
4. На одной из поверхностей элемента — нижней или верхней (рис. 19.16-1, *д*) проходят пересекающиеся трещины двух направлений.

5. Элемент пронизан пересекающимися сквозными трещинами (рис. 19.16-1, *е*).
6. На одной из поверхностей имеются непересекающиеся, а на другой пересекающиеся трещины (рис. 19.16-1, *ж*).

Все схемы могут быть разделены на две крупные группы: группа *Н* — непересекающихся трещин (см. рис. 19.16-1), к которой относятся схемы *а*, *б*, *в*, и группа *П* — пересекающихся трещин, к которой относятся схемы *г*, *д*, *е*, *ж*.

Условия трещинообразования для элементов, подверженных совместному действию моментов и нормальных сил можно сформулировать в виде обобщения теории ядровых моментов трещинообразования стержневых систем. Предложение сводится к распространению теории ядровых моментов А.А. Гвоздева и С.А. Дмитриева [1] на более сложные железобетонные конструкции плит и оболочек.

Две поверхности в элементе, отстоящие от срединной поверхности на расстоянии $\pm r_я$, назовем, соответственно, верхней и нижней поверхностями ядровых точек. Величина $r_я = h/6$ определяется как для полоски плиты по формуле сопротивления материалов.

Введем два новых тензора ядровых моментов: один с компонентами $M_{ях}$, $M_{яу}$ и $M_{яху}$, где

$$M_{ях} = M_x + N_x r_я; \quad M_{яу} = M_y + N_y r_я; \quad M_{яху} = M_{xy} + N_{xy} r_я, \tag{19.16.1}$$

а другой с компонентами

$$M'_{ях} = - M_x + N_x r_я; \quad M'_{яу} = - M_y + N_y r_я; \quad M'_{яху} = - M_{xy} + N_{xy} r_я. \tag{19.16.2}$$

Из самого определения ядровых расстояний, которые вычисляются из условия обращения в нуль напряжения на кромке поперечного сечения [3], следует, что появление положительного ядрового момента означает наличие растяжения на соответствующей кромке. Если считать, что растяжения обязаны восприниматься арматурой, то решение о необходимости армирования принимается на основе анализа следующих неравенств:

для нижней зоны элемента:

$$M_{я.макс} \le 0; \qquad M_{я.мин} \le 0, \tag{19.16.3}$$

для верхней зоны элемента:

$$M'_{я.макс} \le 0; \qquad M'_{я.мин} \le 0. \tag{19.16.4}$$

Если нарушается первое условие (19.16.3), то образуется трещина по схеме *а* (рис. 19.16-1), которая проходит по площадке действия главного ядрового момента $M_{я.макс}$. Угол $\alpha$ наклона этой площадки (трещины) к оси X в момент нарушения первого неравенства (19.16.3) можно определить из известного выражения

$$\operatorname{tg}\alpha = (M_{я.макс} - M_{яу})/ M_{яху}. \tag{19.16.5}$$

При нарушении первого неравенства (19.16.4) образуются трещины по схеме *б* (рис. 19.16-1). Угол наклона верхней трещины к оси X определяется из выражения

$$\operatorname{tg}\alpha = (M'_{я.макс} - M'_{яу})/ M'_{яху}. \tag{19.16.6}$$

Одновременное нарушение первого условия (19.16.3) или первого условия (19.16.4) и дополнительного неравенства $N_{яl} \le 0{,}75 R_р h$ указывает на образование трещин по схеме *в* (рис. 19.16-1). Дополнительное неравенство устанавливается на основании предположения, что сквозные трещины образуются в момент, когда по сечению имеет место однозначная трапецеидальная эпюра растягивающих нормальных напряжений, равных на одной из крайних и срединной поверхности $R_р$, а на другой крайней поверхности — нулю.

Одновременное нарушение первого неравенства (19.16.3) и первого неравенства (19.16.4) указывает на образование трещин по схеме *г* (рис. 19.16-1).

Нарушение двух неравенств (19.16.3) указывает на образование трещин в нижней зоне по схеме *д* (рис. 19.16-1), а нарушение двух неравенств (19.16.4) — образование трещин в верхней зоне аналогично схеме *д*.

Предполагаем, что одновременное нарушение условий (19.16.3) и неравенств $N_{я1} \le 0{,}75R_p h$ и $N_{я2} \le 0{,}75R_p h$ или (19.16.4) и неравенств $N'_{я1} \le 0{,}75R_p h$ и $N'_{я2} \le 0{,}75R_p h$ ведет к образованию трещин по схеме *е* (рис. 19.16-1).

Здесь $N_{я1}$, $N_{я2}$, $N'_{я1}$, $N'_{я2}$ — величины нормальных напряжений на соответствующих площадках действия ядровых моментов.

Одновременное нарушение условия (19.16.3) и лишь одного из неравенств $N_{я1} \le 0{,}75R_p h$ и $N_{я2} \le 0{,}75R_p h$ или условий (19.16.4) и лишь одного из неравенств $N'_{я1} \le 0{,}75R_p h$ и $N'_{я2} \le 0{,}75R_p h$ указывает на образование трещин по схеме *ж* (рис. 19.16-1).

## Проверка прочности

Известно, что угол наклона главных площадок может не совпадать с направлением развития трещин [3]. В связи с этим в комплексе **SCAD** совместно с проверкой армирования выполняется поиск площадок, где условия прочности могут быть нарушены в наибольшей степени. Пусть, например, такая площадка расположена под углом $\alpha$ к оси арматуры X и при этом предполагается, что арматура располагается параллельно осям X и Y декартовой координатной системы. Для простоты рассмотрим только случай, когда трещина в бетоне является несквозной и требуется лишь нижняя арматура (рис. 19.16-2).

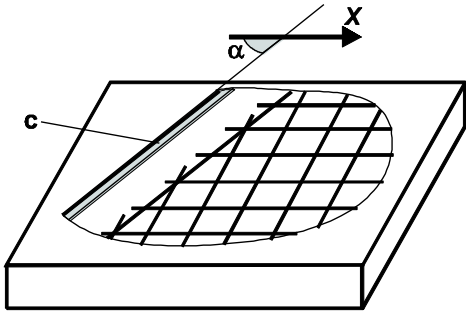



Рис. 19.16-2. *Схема к расчету на прочность*

Если выделить элементарную треугольную призму (рис. 19.16-3) и предположить, что арматура, передающая усилия в трещине, работает только на продольные силы (пренебречь нагельным эффектом), то составляя условия равновесия относительно осей 1 и 2, проходящих через центр сжатой зоны бетона параллельно осям X и Y, получим:

$$R_a F_{a,x} Z\sin\alpha = (M_x + N_x Z_b)\sin\alpha + (M_{yx} + N_{yx} Z_b)\cos\alpha;$$
$$R_a F_{a,y} Z\cos\alpha = (M_y + N_y Z_b)\cos\alpha + (M_{xy} + N_{xy} Z_b)\sin\alpha, \qquad (19.16.7)$$

где Z — плечо растянутой арматуры относительно центра тяжести сжатой зоны бетона, $F_{a,x}$ и $F_{a,y}$ — погонные площади арматуры по направлению X и Y, соответственно. Поскольку призма имеет единичную длину косой площадки, а все внутренние усилия представлены своими значениями на единицу длины, то в уравнения равновесия попадают длины площадок $1\times\sin\alpha$ и $1\times\cos\alpha$, с которых собирается общее усилие.

Нетрудно скорректировать эти уравнения на случай, когда имеется сжатая арматура. Тогда для оси X, например, мы придем к формуле

$$M_{x1} + \sigma' A'_{sx1} Z' - M_{bx1} \le 0, \qquad (19.16.8)$$

где $M_{x1}$ — проекция моментов всех усилий на площадку, перпендикулярную оси X;

$$M_{x1} = (M_x + N_x Z_b) + (M_{yx} + N_{yx} Z_b)\mathrm{ctg}\alpha\ , \qquad (19.16.9)$$

$\sigma' A'_{sx1} Z'$ — момент усилий в арматуре, расположенной в сжатой зоне бетона и работающей на сжатие совместно с бетоном, относительно оси растянутой арматуры; $M_{bx1}$ — момент усилий в сжатой зоне бетона относительно оси растянутой арматуры. Естественно, что при наличии сжатой арматуры уточняется величина сжатой зоны бетона (это делается в итерационном цикле) и соответствующим образом корректируется значение Z.

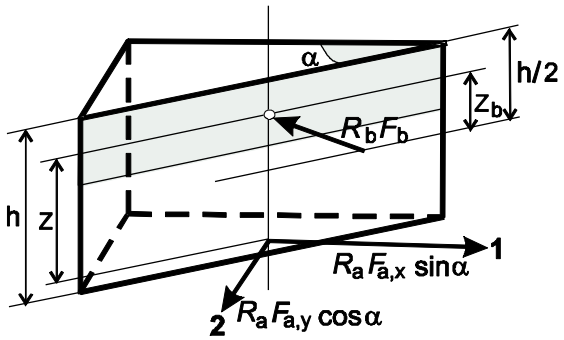



Рис. 19.16-3. *К определению напряжений в арматуре и бетоне на участке косой трещины:* схема усилий на площадке трещины

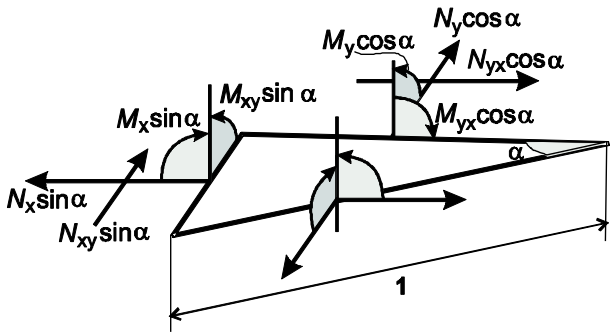



Рис. 19.16-4. *К определению напряжений в арматуре и бетоне на участке косой трещины:* схема моментов и продольных сил, приложенных к граням элементарной треугольной призмы

Абсолютно идентично определяется условие прочности для оси Y (простой заменой величин с нижним индексом *x* на соответствующие величины с нижним индексом *y*).

Для других случаев трещинообразования и схем армирования все рассуждения выполняются аналогично приведенным выше. Они подробно описаны в [3] и в комплексе **SCAD** используются при экспертизе элементов железобетонных конструкций и подборе арматуры.

Упомянутый ранее выбор расположения площадок, где условия прочности могут быть нарушены в наибольшей степени, реализуется прямым перебором углов α с шагом 7.5°. Выполненные сопоставительные расчеты показали, что использование меньшего шага сканирования не приводит к заметным изменениям результатов, но заметно замедляет вычисления.

## Расчет на действие поперечных сил

При расчете пластин на действие поперечных сил **SCAD** производит два раздельных расчета – на действие $Q_x$ и действие $Q_y$. При каждом из этих двух расчетов из пластины "вырезается" в соответствующем направлении полоса единичной ширины. Далее эта полоса рассчитывается на действие поперечной силы как изгибаемый элемент в соответствии с указаниями норм для стержневых элементов.

Если проанализировать метод расчета пластин на действие поперечных сил, то видно, что прочность определяется одной единственной величиной интенсивности $W = \frac{a_w}{s_x s_y}$ ($a_w$ — площадь сечения одного стержня поперечной арматуры), то есть количеством поперечной арматуры на единицу площади.

При этом не имеет никакого значения, каковы конкретные значения диаметра арматуры и шагов — важно только, чтобы величина $W$ была больше некоторого значения, которое обеспечивает выполнение неравенства типа $\frac{Q}{0.5 \cdot R_{bt} \cdot h_0 + W \cdot R_{sw} \cdot h_0} \le 1.$

При определении требуемого поперечного армирования *по сортаменту* программа подбирает тройку — диаметр (исходя из набора диаметров заданного класса арматуры и ограничения на максимальный диаметр) и два шага (из списка допустимых шагов) — такую, чтобы величина $W$ была больше *расчетного* значения и давала минимальную интенсивность (минимизировала расход металла). При этом погонные интенсивности по направлениям $W_x$,$W_y$ могут быть как меньше расчетных значений, так и значительно их превышать.

## Определение ширины раскрытия трещин

Расчет по раскрытию трещин выполняется так же, как и при расчете по прочности, по одному из вариантов их образования.

Используются две предпосылки:

- на участке между смежными трещинами допустимо пренебречь изменением напряженного состояния;

- можно считать смежные трещины параллельными.

В соответствии с положениями В.И. Мурашева [4], положенными в основу действующего СНиП, принимается, что смежная трещина образуется на таком расстоянии $l_{cr}$, при котором напряжение в арматуре за счет сил сцепления с бетоном уменьшается с величины $\sigma^{T}_{a}$ до $\sigma^{0}_{a}$, а усилия в бетоне возрастают от нуля у трещины до значений, вызывающих образование новой трещины. Предварительно определяются величины:

$$L_{crc,x}= (bh^2/3{,}5)(d_x/4)\eta\ \varphi_l / (A_{sx}Z)\cos\alpha;$$
$$L_{crc,y}= (bh^2/3{,}5)(d_y/4)\eta\ \varphi_l / (A_{sy}Z)\sin\alpha\ , \qquad (19.16.10)$$

где $d_x$ и $d_y$ - диаметры арматуры;

$\eta$ — коэффициент, учитывающий профиль арматуры;

$\varphi_l$ — коэффициент, учитывающий продолжительность действия нагрузки для различных видов бетона.

Среднее расстояние между трещинами $L_{crc}$ определяется как максимальное из двух значений (19.16.10) поскольку максимум из них определяет область пластины, где полностью восстановлено сцепление арматуры с бетоном в двух направлениях.

В качестве погонной интенсивности армирования (площадь арматуры на единицу длины) $A_{sx}$ и $A_{sy}$ принимается значение для нижней или верхней (в зависимости от ситуации) арматуры соответствующего направления.

Напряжения в арматуре определяются по формуле:

$$\sigma_{sx} = M_x / (A_{sx}Z);\ \ \sigma_{sy} = M_y / (A_{sy}Z), \qquad (19.16.11)$$

где $M_i$ — проекция моментов всех усилий, действующих на сечение, относительно оси соответствующей растянутой арматуры (i = x, y);

Z — плечо растянутой арматуры относительно центра тяжести сжатой зоны бетона;

$A_{sx}$ и $A_{sy}$ — площадь растянутой арматуры на единицу длины.

Ширина раскрытия трещин определяется по формуле:

$$a_{crc}= (\varepsilon_{sx} + \varepsilon_{sy})L_{crc}\ , \qquad (19.16.12)$$

где $\varepsilon_{sx}= (\sigma_{sx}* \psi_s) / E_s$ и $\varepsilon_{sy}= (\sigma_{sy}* \psi_s) / E_s$. Здесь $\psi_s$ — коэффициент, учитывающий работу растянутого бетона на участке с трещинами и определяемый согласно указаниям п. 4.29 СНиП.

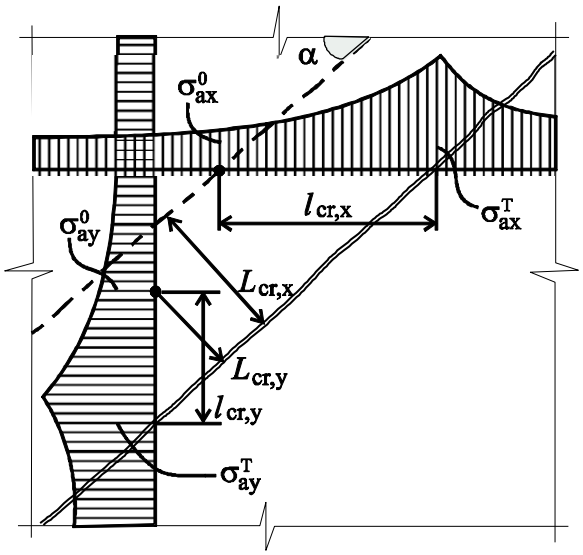



Рис. 19.16-5. *Фрагмент поверхности пластины с трещиной*.
Эпюры изменения растягивающих напряжений в арматуре
от значений $\sigma^{T}_{ax}$ и $\sigma^{T}_{ay}$ у трещины до значений $\sigma^{0}_{ax}$ и $\sigma^{0}_{ay}$ в месте образования новой трещины

Таким образом, ширина раскрытия трещин определяется через среднее расстояние между ними и напряжения в арматуре без использования полуэмпирической зависимости, приведенной в СНиП для стержневых элементов.

### Общая схема алгоритма

В общем случае имеется необходимость определить значения для шести видов арматуры (рис. 19.16-6).

Предварительно определяется набор невыгодных сочетаний загружений. В этот набор входят внутренние усилия, создающие экстремальные значения нормальных напряжений на внешней и внутренней поверхностях, а также экстремальные значения касательных напряжений по направлению толщины пластины. Используются значения, относящиеся к средним точкам конечных элементов.

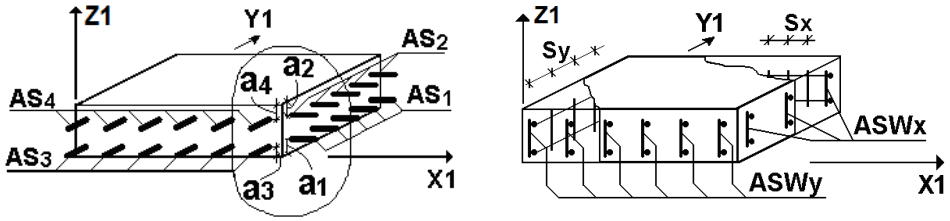



Рис. 19.16-6. *Схема армирования сечений конечного элемента плиты и оболочки*

Для каждого конечного элемента пластины перебором вариантов сочетаний проверяется прочность пластины (определяются ядровые моменты, находятся углы $\alpha$, выясняется возможная схема трещинообразования и т. д.) и, если условия прочности не выполняются, увеличивается значение интенсивности армирования. Это выполняется до тех пор, пока не будут удовлетворены условия прочности или же не обнаружится, что обеспечить условия прочности не превосходя заданного максимального процента армирования невозможно, о чем выдается соответствующее сообщение.

Далее для подобранного армирования выполняется (если это необходимо) проверка ширины раскрытия трещин. Если ширина раскрытия трещин превышает допустимую, площадь арматуры наращивается до тех пор, пока ширина раскрытия трещин не станет удовлетворительной. При подборе продольной и поперечной арматуры от действия каждого последующего сочетания учитывается арматура, подобранная от действия предыдущих сочетаний.

## 19.17.Реализация СНиП 52-101-2003 и СП 63.13330

В вычислительном комплексе **SCAD** реализован подбор и экспертиза арматуры в элементах железобетонных конструкций в соответствии с рекомендациями СНиП 52-01-2003 (СП 52-101-2003) и СП 63.13330. Отметим, что СП 52-101-2003 не предусматривает анализа работы железобетонных конструкций при наличии динамических воздействий. **SCAD** не запрещает расчеты такого вида, однако ответственность за использование результатов расчета в этой ситуации должен взять на себя пользователь.

В процессе расчета нормальных сечений использованы положения СНиП и СП, относящиеся к нелинейной деформационной модели работы железобетона. При анализе прочности по нелинейной деформационной модели используется рекомендуемая СНиП двухлинейная диаграмма состояния бетона, а при расчете образования трещин — рекомендуемая СНиП трехлинейная диаграмма состояния бетона.

Кроме рекомендаций СНиП и СП при анализе поперечного армирования использованы материалы, приведенные в Пособии к СП 52-101-2003 (п.п. 3.29-3.35, 3.50, 3.52, 3.71, 4.28).

В процессе подбора арматуры выполняются следующие основные проверки сечений:

| | **СП 52-101-2003** | **СП 63.13330** |
|---|---|---|
| Деформация бетона в нормальном сечении | п. 6.2.25 | п. 8.1.24 |
| Деформация арматуры в нормальном сечении | п. 6.2.25 | п. 8.1.24 |
| Деформация растянутого бетона в нормальном сечении | п. 6.2.30 | п. 8.1.29 |
| Прочность наклонной бетонной полосы по $Q_z$ | п. 6.2.33 | п. 8.1.32, 8.1.34 |

| | СП 52-101-2003 | СП 63.13330 |
|---|---|---|
| Прочность наклонной бетонной полосы по $Q_y$ | п. 6.2.33 | п. 8.1.32, 8.1.34 |
| Прочность наклонного сечения по поперечной силе $Q_z$ | п. 6.2.34 | п. 8.1.33, 8.1.34 |
| Прочность наклонного сечения по поперечной силе $Q_y$ | п. 6.2.34 | п. 8.1.33, 8.1.34 |
| Прочность наклонного сечения по моменту $M_z$ | п. 6.2.35 | п. 8.1.35 |
| Прочность наклонного сечения по моменту $M_y$ | п. 6.2.35 | п. 8.1.35 |
| Прочность на кручение по бетону | п. 6.2.37 | п. 8.1.37 |
| Прочность элемента между пространственными сечениями | п. 6.2.41 | п. 8.1.41 |
| Прочность на кручение по арматуре | п. 6.2.38 | п. 8.1.38 |
| Непродолжительная ширина раскрытия трещин | п. 7.2.3 | п. 8.2.6 |
| Продолжительная ширина раскрытия трещин | п. 7.2.3 | п. 8.2.6 |

Следует отметить, что в случае СП 63.13330 расчет на кручение в программе производится на основании классических формул Мерша-Рауша [7]. Это связано с тем, что при использовании рекомендуемой СП деформационной модели при анализе сжатых элементов, подверженных кручению, в п. 8.1.40 предлагается ссылка на п. 8.1.9, который, во-первых, относится к силовой модели (хотя расчет по деформационной модели позволяет определить такое понятие, как предельный изгибающий момент) и, во-вторых, относится к расчету изгибаемых элементов только прямоугольного сечения. Аналогичные несоответствия есть и в СП 52-101-2003.

При расчетах по СП 52-101-2003 или СП 63.13330 программа вычисляет факторы:

- Прочность по предельной продольной силе;
- Прочность по предельному моменту.

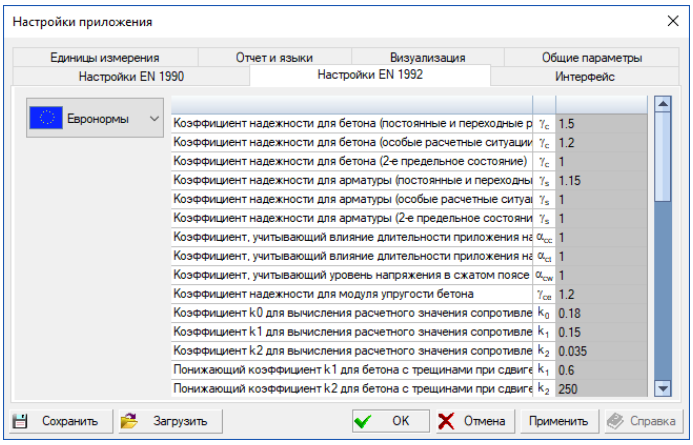
Первый из них представляет собой отношение $\frac{|N|}{R_s A_{s,tot}}$ для растянутых элементов и $\frac{|N|}{R_s A_{s,tot} + R_b A}$ для сжатых элементов. Хотя формально требования проверки данного фактора в нормах нет (за исключением п. 6.2.19 СП 52-101-2003 и п. 8.1.18 СП 63.13330), фактически без проверки того факта, что эта величина меньше единицы, мы не можем проводить другие расчеты, например, вычислить коэффициент $\varphi_n$ в п. 8.1.34 СП 63.13330. По аналогичным соображениям был введен фактор *Прочность по предельному моменту*, который представляет собой число, на которое следует разделить $N$, $M_y$, $M_z$, чтобы получить предельно допустимые значения деформаций бетона или арматуры.

## 19.18.Особенности расчетов по EN 1992-1-1

Если в качестве норм проектирования выбран EN 1992-1-1, то при задании информации о бетоне требуется следующая информация:

- Класс бетона;
- Заполнитель бетона;
- Возраст бетона;
- Класс прочности цемента;
- Время развития ползучести;
- Температура T в течении периода развития ползучести;
- Количество суток, когда температура T преобладает;
- Относительная влажность воздуха;
- Дополнительный коэффициент условий работы.

Различные коэффициенты и частные коэффициенты безопасности берутся из соответствующих национальных приложений, выбор которых (и модификация допустимых этими приложениями параметров) может быть выполнен на странице **Настройки EN 1992** многостраничного окна **Настройки**.




Дополнительные коэффициенты условий работы бетона и арматуры позволяют изменить расчетные сопротивления материалов и используются совместно с оговоренными EN 1992-1-1 коэффициентами типа $\gamma_s$, $\alpha_{CC}$, … . Расчетные сопротивления *делятся* на эти дополнительные коэффициенты.

При расчете по EN 1992-1-1 не требуется информация о случайных эксцентриситетах и статической определимости. Учет геометрических несовершенств производится автоматически в соответствии с п. 5.2(9). Эффекты второго порядка учитываются методом, основанным на номинальной жесткости (п. 5.8.7). При этом в формуле (5.29) используется значение $c_0$=8, поскольку это идет в запас надежности, а кроме того, это значение применимо как в случае одноосного напряженного состояния, так и при косом изгибе (см. Примечание к п. 5.8.7.3(3)). Учет ползучести производится на основании рекомендаций Приложения B.

Анализ прочности нормальных сечений производится на основании диаграмм деформирования бетона и арматуры (п. 6.1). При этом используются билинейные диаграммы типа Прандтля (см. рис. 3.4, 3.8 EN 1992-1-1).

В отличии от СНиП при задании данных для анализа трещиностойкости задается только одна величина — максимальная ширина раскрытия трещин (п. 7.3.1(5)), которую пользователь должен задать сам (используя, например, таблицу 7.1N EN 1992-1-1). Расчет ширины раскрытия трещин производится только в случае одноосного напряженного состояния, поскольку EN 1992 рассматривает только случай растянутой зоны прямоугольной формы. По этой же причине не реализован расчет ширины раскрытия трещин для круглых сечений.

Анализ работы пластинчатых элементов производится на основании теории Карпенко с использованием свойств материалов (бетона и арматуры), приведенных в EN 1992-1-1. При расчете плит на действие поперечных сил используются рекомендации EN 1992-1-1.

Проверка сечений стержневых элементов конструкций на соответствие требованиям EN 1992-1-1 выполняется по следующим факторам:

| **Проверка** | **Ссылка на EN 1992-1-1** |
|---|---|
| Прочность по предельному моменту сечения | |
| Деформации в сжатом бетоне | п. 6.1(3)P |
| Деформации в растянутой арматуре | п. 6.1(3)P |
| Продольная сила при учете эффектов второго порядка | п. 5.8.7.3 |
| Напряжение при образовании трещин | п. 7.1(2) |
| Ширина раскрытия трещин | п. 7.3.4 |
| Сопротивление срезу при действии $V_z$ без поперечной арматуры | п. 6.2.2 |
| Сопротивление срезу при действии $V_y$ без поперечной арматуры | п. 6.2.2 |
| Сопротивление срезу при действии $V_z$ с поперечной арматурой | п. 6.2.3 |
| Сопротивление срезу при действии $V_y$ с поперечной арматурой | п. 6.2.3 |
| Прочность сечения при воздействии крутящего момента | п. 6.3.2 (4) |
| Сопротивление продольной арматуры крутящему моменту | п. 6.3.2 (4) |

| Проверка | Ссылка на EN 1992-1-1 |
|---|---|
| Сопротивление поперечной арматуры крутящему моменту | п. 6.3.2 (4) |
| Прочность при совместном действии поперечной силы и крутящего момента | п. 6.3.2(4) |
| Уровень напряжений в бетоне | п. 7.2 |
| Уровень напряжений в арматуре | п. 7.2 |

*Замечание.* Фактор *Прочность по предельному моменту* представляет собой число, на которое следует разделить $N$, $M_y$, $M_z$, чтобы получить предельно допустимые значения деформаций бетона или арматуры.

Проверка пластинчатых элементов конструкций выполняется по следующим факторам:

| Проверка | Ссылка на EN 1992-1-1 |
|---|---|
| Прочность сечения плиты | |
| Сопротивление срезу при действии $V_x$ без поперечной арматуры | п. 6.2.2 |
| Сопротивление срезу при действии $V_y$ без поперечной арматуры | п. 6.2.2 |
| Сопротивление срезу при действии $V_x$ с поперечной арматурой | п. 6.2.3 |
| Сопротивление срезу при действии $V_y$ с поперечной арматурой | п. 6.2.3 |
| Возможность образования трещин | п. 7.1(2) |
| Ширина раскрытия трещин | |

## 19.19.Особенности расчетов по ДБН В.2.6-98:2009

Если в качестве норм проектирования выбран ДБН В.2.6-98:2009 (ДСТУ Б В.2.6-156:2010), то следует отметить, что эти нормативные документы содержат огромное количество ошибок и они не согласованы с другими нормативными документами Украины, в частности, с ДБН В.1.2-2:2006.

Поскольку ДБН В.2.6-98:2009 и ДСТУ Б В.2.6-156:2010 созданы на основании EN 1992-1-1, то при программной реализации этих норм в тех случаях, когда возникают противоречия, программа использует соответствующие положения EN 1992-1-1.

## 19.20.Факторы в деформационной и силовой моделях

При сравнении результатов расчета по предельным усилиям и по нелинейной деформационной модели часто возникает ситуация, при которой факторы (коэффициенты использования нормативного ограничения) отличаются многократно. Чтобы пояснить причину такого расхождения, рассмотрим расчет прочности нормального сечения центрально растянутого стержня.

При расчете по предельным усилиям должно быть выполнено ограничение (см. п. 8.1.18 СП 63.13330)

$$N \le R_s A_{s,tot},$$

где $N$ – продольная растягивающая сила от внешних нагрузок;

$R_s$ – расчетное сопротивление арматуры растяжению;

$A_{s,tot}$ – площадь сечения всей продольной арматуры.

В этом случае соответствующий фактор равен

$$k_{force} = N / R_s A_{s,tot},$$

то есть $k_{force}$ зависит от $N$ линейно.

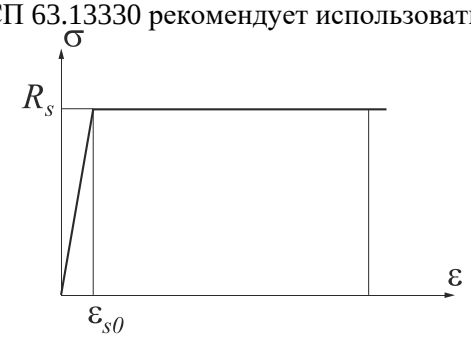
При использовании нелинейной деформационной модели должно быть выполнено ограничение (см. п. 8.1.24 СП 63.13330)

$$k_{def} = \varepsilon_{s,max} / \varepsilon_{s,ult} \le 1,$$

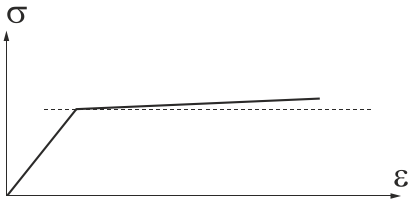
где $\varepsilon_{s,max}$ – относительная деформация наиболее растянутого стержня арматуры в нормальном сечении элемента от действия внешней нагрузки;

$\varepsilon_{s,ult}$ – предельное значение относительной деформации удлинения арматуры.

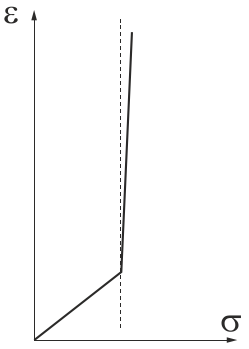
То есть, зная величину $N$ (или напряжение в арматуре $\sigma_s=N/A_{s,tot}$), следует определить относительную деформацию арматуры $\varepsilon$ на основании диаграммы состояния, и сравнить ее с предельно допустимой ($\varepsilon_{s,ult}$). СП 63.13330 рекомендует использовать диаграмму следующего вида:




Если величина $N/A_{s,tot} < R_s$, то никаких проблем не возникает, но уже при $N/A_{s,tot} = R_s$ рекомендуемая СП диаграмма не позволяет однозначно определить $\varepsilon$ ($\varepsilon$ может принимать любое значение, превышающее $\varepsilon_{s0}$) и получить фактор, который позволит сделать вывод о том, насколько следует повысить несущую способность сечения (или понизить величину продольной силы), чтобы были выполнены требования норм. Поэтому в расчетах по **SCAD** или **Арбат** используется модифицированная диаграмма, в которой верхний участок не горизонтальный, а немного наклонен:

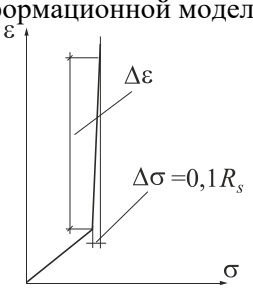



Изобразим эту диаграмму следующим образом:




Предположим, что продольная сила превышает предельно допустимую по п. 8.1.18 на 10%, то есть $k_{force} = 1{,}1$.

При использовании нелинейной деформационной модели мы получим следующую картину:




то есть относительная деформация значительно возросла (намного больше 10%), и мы получаем фактор $k_{def} >> 1{,}1$.

Рассмотрим еще один пример, который демонстрирует значительную разницу между $k_{def}$ и $k_{force}$ в ситуации, когда требования СП по прочности нормальных сечений выполнены. Рассматривая опять центрально растянутый элемент с арматурой класса А500, предположим, что продольная сила такова, что в арматуре возникает напряжение равное $0.99R_s$. Очевидно, что при этом $k_{force}$=0.99. Деформация арматуры при этом равна $0.99e_{s0}$, где (согласно в. 6.2.11 СП 63.13330) $e_{s0}=R_s/E_s=0.002175$. То есть $k_{def}=0.99e_{s0}/e_{s,ult}=0.8613$.

Аналогичная ситуация может возникать и при сравнении других факторов.

## 19.21. Расчет круглых сечений

Формально имеющиеся в нормах проектирования правила расчета стержневых элементов на действие поперечных сил не содержат ограничений на форму поперечного сечения. Однако использование параметров $b$ и $h_0$ приводит к тому, что расчет элементов с круглым поперечным сечением теряет смысл.

Чтобы обойти эту проблему, в программе используется следующий прием. Круглое сечение с радиусом $R$ заменяется на квадрат по площади равновеликий кругу с радиусом $R$-$a$, где $a$ — расстояние до центра тяжести арматуры. Аналогично производится расчет кольцевых сечений.

Отметим, что аналогичные рекомендации содержатся в п. 3.3 *Методических рекомендаций по проектированию и расчету подпорных стен из буронабивных свай*.

## 19.22. Примеры использования результатов подбора арматуры при конструировании

На примерах подобранной программой поперечной арматуры рассмотрим применение полученных результатов при принятии решений по конструированию.

**Пример №1**:

В конечном элементе оболочки, вычисленная погонная интенсивность поперечного армирования составила:

$$W_x = 4{,}5 \text{ см}^2/\text{м};$$
$$W_y = 6{,}5 \text{ см}^2/\text{м}.$$

**Задача:** Определить шаг поперечной арматуры $s_x$ и $s_y$ для обеспечения указанной интенсивности.

**Решение**:

Примем для поперечной арматуры стержни диаметром 10 мм (площадь сечения стержня $a_w = 78{,}54 \text{ мм}^2 = 0{,}7854 \text{ см}^2$). Шаг арматурных стержней вдоль оси $Y_1$ составит:

$$s_y = \frac{a_w}{W_y} = \frac{0{,}7854}{6{,}5} = 0{,}121 \text{ м} = 120 \text{ мм};$$

Шаг арматурных стержней вдоль оси $X_1$ составит:

$$s_x = \frac{a_w}{W_x} = \frac{0{,}7854}{4{,}5} = 0{,}175 \text{ м} = 175 \text{ мм}.$$

Приведем шаг поперечных стержней к «стандартному», — кратному 50 мм (например, 50, 100, 150, …). Для обеспечения необходимой интенсивности, шаг поперечной арматуры принимаем (с округлением в меньшую сторону) $s_y$ = 100 мм, $s_x$ = 150 мм.

**Пример №2**:

В конечном элементе оболочки вычисленная погонная интенсивность поперечного армирования составила:

$$W_x = 4{,}5 \text{ см}^2/\text{м};$$
$$W_y = 6{,}5 \text{ см}^2/\text{м}.$$

**Задача:** Определить диаметр поперечной арматуры для обеспечения указанной интенсивности при условии:

$$s_x = s_y = 150 \text{ мм} = 0{,}15 \text{ м}.$$

**Решение**:

Площадь сечения стержня поперечной арматуры (расположенной вдоль оси $Y_1$ с шагом $s_y$) обеспечивающая интенсивность $IW_y$:

$$a_w = W_y \cdot s_y = 6{,}5 \cdot 0{,}15 = 0{,}975 \text{ см}^2.$$

Ближайшая по сортаменту арматура — ∅ 12 мм, ($a_w$ = 113,1 мм$^2$ = 1,131 см$^2$).

Площадь сечения стержня поперечной арматуры (расположенной вдоль оси $X_1$ с шагом $s_x$) обеспечивающая интенсивность $W_x$:

$$a_w = W_x \cdot s_x = 4,5 \cdot 0,15 = 0,675 \text{ см}^2.$$

Ближайшая по сортаменту арматура — ∅ 10 мм ($a_w$ = 78,54 мм$^2$ = 0,7854 см$^2$).

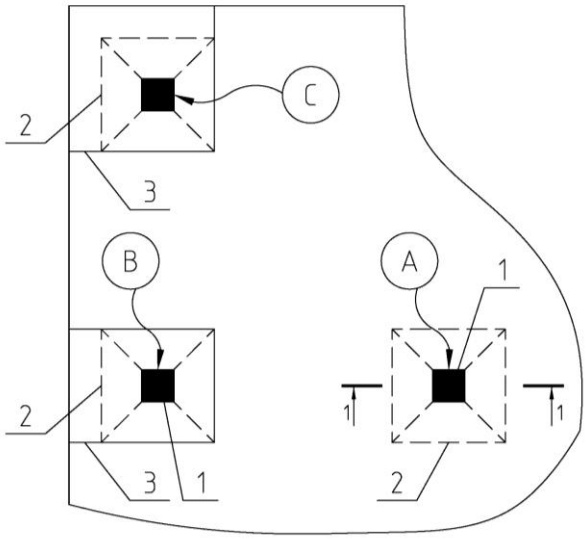
Поскольку стержень поперечной арматуры работает одновременно в обоих направлениях, то для обеспечения необходимой интенсивности армирования при заданном шаге $s_x$ = $s_y$ = 0,15 м принимаем диаметр ∅12 мм.

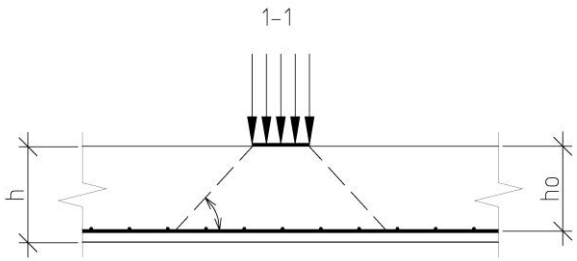
## 19.23.Расчет на продавливание

Расчет элементов плиты на продавливание производится при действии на них местных концентрированно приложенных усилий – сосредоточенной силы (нормальной к плоскости элемента) и изгибающих моментов в двух плоскостях по методике, оговоренной в СНиП 2.03.01-84*, КМК 2.03.01-96, СП 52-101-2003 и СП 63.13330.

Предполагается, что продавливание происходит по боковой поверхности пирамиды.

В программе приняты одинаковыми общие подходы по классификации расчетного случая продавливания, классификации типа колонны (средняя, крайняя и угловая – см. рисунок) как для СНиП, так и для СП (хотя, например, в СНиП рассмотрен только случай средней колонны прямоугольного сечения).



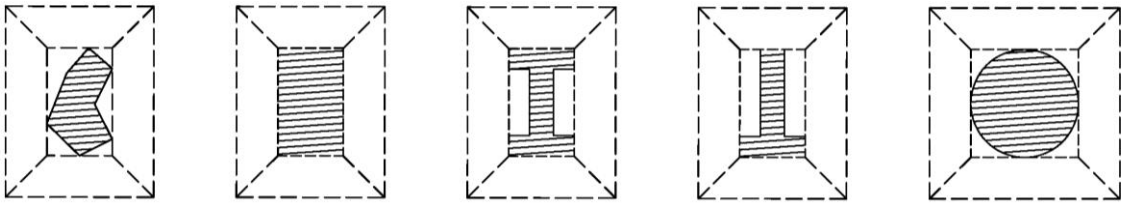




A – средняя колонна;
B – крайняя колонна;
C – угловая колонна;

*1 – площадь приложения нагрузки (грузовая площадь); 2 – замкнутый расчетный контур;*
*3 – незамкнутый расчетный контур;*

При расчете на продавливание учитывается положение колонны по отношению к свободному краю плиты. При этом различают среднюю, крайнюю и угловую колонны (см. рисунок). В зависимости от положения колонны при выполнении расчета по-разному определяется длина расчётного контура продавливания.

Расчет производится как для бетонного сечения плиты, так и для сечения плиты с поперечной арматурой. В программе рассматривается только равномерное расположение поперечной арматуры вокруг площадки приложения нагрузки.



*Приведение разных сечений колонн к расчетному прямоугольнику*

Проверка прочности бетонного сечения производится всегда, и в случае необходимости выполняется подбор минимально необходимой интенсивности поперечного армирования (диаметр и шаг по двум направлениям).

Кроме непосредственно проверки прочности элементов на действие местной нагрузки при продавливании, в ходе расчета производится также проверка ряда конструктивных требований норм (в некоторых случаях они являются обязательными).

В нормах площадь приложения нагрузки при продавливании рассматривается только в виде прямоугольника. Для расчета других форм поперечного сечения колонны вокруг них строится минимальный описанный прямоугольник со сторонами параллельными главным осям инерции сечения колонны.

Вокруг каждой колонны строится контур расчетного поперечного сечения. Для **средней** колонны этот контур всегда замкнутый и располагается вокруг зоны (площадки) передачи нагрузки (контура грузовой площадки) на оговоренном нормами расстоянии. Для **угловой** и **крайней** колонн рассматривается два контура продавливания – замкнутый и незамкнутый (Г-образный для угловой и П-образный для крайней). Кроме того, согласно рекомендациям СП52-101-2003 и СП 63.13330 выполняется проверка прочности для контура, за пределами которого поперечная арматура не учитывается.

Для расчета на продавливание следует предварительно вычислить расчетные сочетания усилий продавливания. Отметим, что вычисление данных расчетных сочетаний в процессе общего расчета автоматически не выполняется, и пользователь должен специально активировать этот расчет из дерева проекта.

**Проверки при расчете на продавливание**

| Проверка | Ссылка на СНиП 2.03.01-84*, КМК 2.03.01-96 | Ссылка на СП 52-101-03 | Ссылка на СП 63.13330 |
|---|---|---|---|
| Прочность без учета армирования | п.3.42 | 6.2.49 | п.8.1.49 |
| Прочность с учетом армирования | п.3.42 | 6.2.50 | п.8.1.50 |

**Особенности реализации**

В СНиП 2.03.01-84*, КМК 2.03.01-96 рассмотрен случай только средней колонны. Если колонна является угловой или боковой, то в этом случае при определении длины контура нижнего основания пирамиды используется методика СП 63.13330.

Если пластинчатые элементы, находящиеся вблизи узла продавливания, имеют различную толщину, то в запас прочности в расчетах принимается минимальная толщина.

Нормы не дают четких рекомендаций о правилах классификации типа колонны (средняя, крайняя и угловая). В программе при расчете принято, что приближения к свободным краям плиты (для угловой и боковой колонны) учитываются в том случае, когда расстояние от границы области приложения нагрузки до свободного края не превышает 3 рабочих высоты ($h_0$) продольной арматуры плиты вдоль одной из осей X, Y (свободный край плиты), либо одновременно вдоль обоих осей X, Y (свободный угол плиты).

Так как конкретная расстановка поперечных арматурных стержней вокруг колонны неизвестна, то введено ограничение (в запас прочности) — принять границу контура поверочного расчета без

учета арматуры на расстоянии $0{,}5h_0$ от границы зоны, в пределах которой в расчете учитывается поперечная арматура.

## Подготовка данных, расчет и анализ результатов



Управление операциями подготовки исходных данных, выполнения расчета и анализа результатов при расчете на продавливание сосредоточено в инструментальной панели, которая вызывается из раздела инструментальной панели **Железобетон** (рис. 19.23-1).

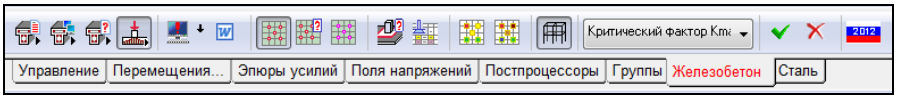



Рис. 19.23-1. *Инструментальная панель расчета на продавливание*

Эта инструментальная панель включает кнопки вызова следующих операций:

 — активация расчета;

 — формирование отчета;

 — задания узлов продавливания;

 — селекция узлов продавливания;

 — визуализация узлов продавливания;

 — показать контуры продавливания;

 — визуализация результатов экспертизы на схеме (3-х цветная шкала);

 — визуализация результатов экспертизы на схеме (полноцветная шкала);

 — показать результаты расчета на продавливание (в табличной форме);

 — отображение расчетной схемы;

 — индикация норм проектирования.

## Назначение узлов продавливания



Эта операция используется для создания списка узлов продавливания и его корректировки путем замены списка, добавления узлов в список и удаления из него. После ее активации появляется диалоговое окно **Назначение узлов продавливания** (рис. 19.23-2), в котором выбирается способ назначения узлов, а также операции со списком (в случае существующего списка).

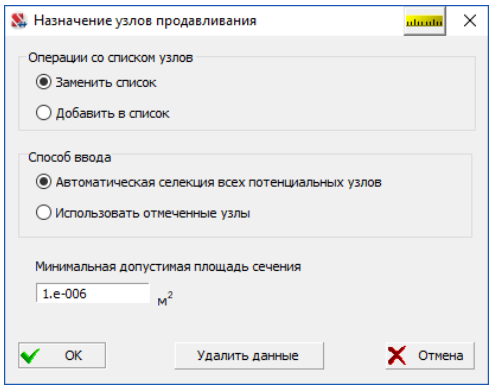



Рис. 19.23-2. *Диалоговое окно* **Назначение узлов продавливания**

При назначении узлов продавливания предусмотрено два режима — автоматический и "ручной". Автоматическое формирование списка подразумевает, что узлом продавливания назначается любой узел, который одновременно принадлежит горизонтальным пластинчатым элементам и вертикальному стержню, расположенному снизу или сверху пластины. Кроме того, узел не должен принадлежать другим горизонтальным или наклонным стержням.

При "ручном" задании списка узлов или его корректировке необходимо выполнить следующие действия:

- активировать операцию **Задание узлов продавливания** и в одноименном диалоговом окне в группе **Способ ввода** выбрать опцию **Использовать отмеченные узлы**;
- в группе **Операции со списком узлов** выбрать опцию **Заменить список**. В этом случае, если список ранее не был сформирован, то из отмеченных узлов будет создан новый список; в противном случае выбранные узлы заменят в списке ранее заданные. Если активна опция **Добавить в список**, то выбранные узлы пополнят ранее сформированный список;
- выйти из диалогового окна нажатием на кнопку **OK** и выбрать на расчетной схеме узлы, для которых следует выполнить расчет на продавливание;
- нажать кнопку **Подтверждение** в инструментальной панели, после чего список будет сформирован.

Для удаления сформированного списка в диалоговом окне используется кнопка **Удалить данные**.

Кроме того, в рассматриваемом диалоговом окне предусмотрена возможность указать минимальную площадь поперечного сечения колонн, которые следует учитывать при выполнении расчета на продавливание. Узлы колонн с меньшей площадью сечения в список узлов продавливания попадать не будут.

### Селекция узлов продавливания



Операция используется для выбора узлов, входящих в список узлов продавливания (если предполагается выполнение некоторых действий с этими узлами).

### Визуализация узлов продавливания



С помощью этой операции выполняется визуализация («подсветка») узлов продавливания на расчетной схеме. Этот способ селекции не предусматривает выполнения операций с выделенными таким образом объектами.

## Расчет



Для расчета на продавливание необходимо, чтобы все горизонтальные пластинчатые элементы, примыкающие к конкретному узлу или находящиеся в окрестности этого узла внутри или на границе контура продавливания, принадлежали одной основной группе армирования пластин.

Если для пластинчатых конечных элементов, входящих в зону анализа узла продавливания, отсутствует информация о заданном поперечном армировании, то расчет производится без учета армирования.

## Визуализация контуров продавливания



Операция используется для отображения на расчетной схеме контуров продавливания, полученных в результате расчета, а также грузовых площадок. Контуры рисуются пурпурным цветом, а площадки — голубым (рис. 19.23-3). При расчетах по СП в случае угловой или боковой колонн на экран будет выведен контур (замкнутый или незамкнутый), который соответствует большему коэффициенту использования ограничений.

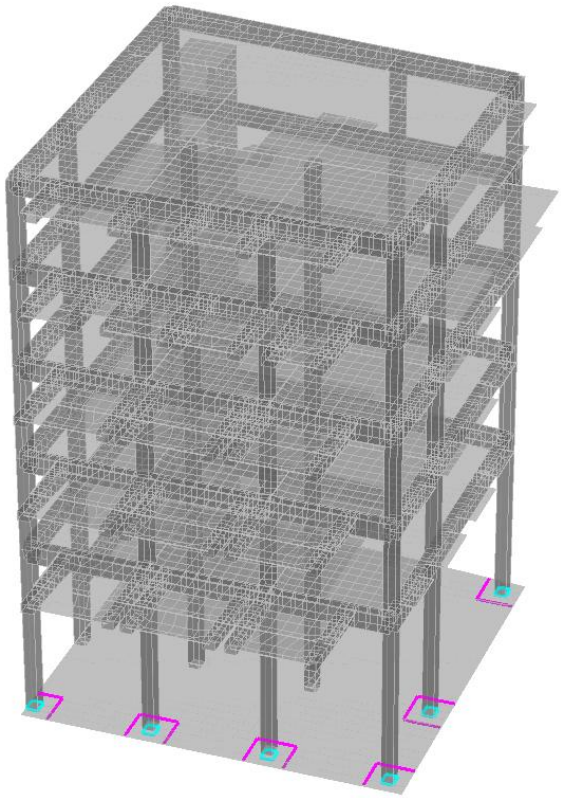


Рис. 19.23-3. *Расчетная схема и контуры продавливания*

## Отображение результатов



Результаты проверки на продавливание представлены в виде коэффициентов использования ограничений.

Предусмотрены два вида отображения результатов проверки — в виде трехцветной и полноцветной шкалы. В первом случае для отображения используется операция **Отображение результатов экспертизы на схеме (3-х цветная шкала)** —  , при выполнении которой узлы продавливания окрашиваются в три цвета:

- зеленый — несущая способность обеспечена;
- красный — несущая способность недостаточна;
- желтый — значение коэффициента ограничений находится вблизи критического значения (фактор близок к 1,0).

Критический диапазон задается путем настройки цветовой шкалы в диалоговом окне **Настройки**, которое вызывается нажатием одноименной кнопки —  .

Например, если в диалоге (рис. 19.23-4) задать величину 0,03, то все элементы с величиной фактора меньше 0,97 будут окрашены в зеленый цвет, при факторе больше 1,03 — в красный, а в том случае, когда фактор находится в диапазоне [0,97;1,03] — будет использован желтый цвет.

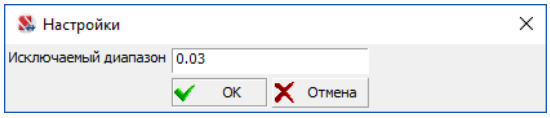



Рис. 19.23-4. *Диалоговое окно* **Настройки**

При использовании режима отображения в виде полноцветной шкалы (кнопка **Отображение результатов экспертизы на схеме (полноцветная шкала)** —  ) появится обычная цветовая шкала с настраиваемым количеством цветов.

В списке факторов содержится перечень произведенных проверок, и на схеме можно отобразить результаты проверки по каждому из факторов, определяющих несущую способность объектов проверки (например, прочности без учета армирования). Значения выбранного фактора можно вывести на схему, воспользовавшись кнопкой фильтров **Оцифровка** —  .

## Таблица результатов



Операция позволяет получить в табличной форме результаты расчета на продавливание (рис. 19.23-5). Для каждого узла продавливания выводятся длины контуров нижнего и верхнего оснований пирамиды продавливания, фактор по прочности без учета армирования $K_1$ и/или фактор по прочности с учетом армирования $K_2$. Фактор $K_2$ вычисляется только в том случае, когда все горизонтальные пластины, примыкающие к узлу продавливания, имеют одинаковое заданное поперечное армирование; кроме того, в столбцах **Подобранное армирование** выводится диаметр и шаг (в направлениях X, Y) оптимального (с точки зрения расхода поперечной арматуры) поперечного армирования пластин.

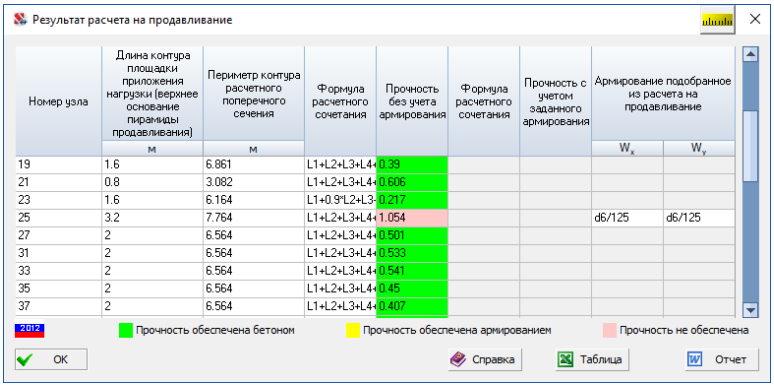



Рис. 19.23-5. *Диалоговое окно* **Результат расчета на продавливание**

Отметим, что подбор армирования в некоторых случаях невозможен. Например, при расчетах по СНиП 2.03.01-84*, КМК 2.03.01-96, если фактор по прочности без учета армирования больше 2,0, то установка поперечной арматуры не может обеспечить прочность на продавливание (см. ограничение $Fb+0,8Fsw \le 2Fb$ в п. 3.42).

### Формирование отчета



По результатам экспертизы можно сформировать отчет. Он формируется в формате **RTF** и автоматически загружается в ассоциированное с этим форматом приложение (например, MS Word или WordPad). Перед формированием отчета появляется диалоговое окно (рис. 19.23-6), в котором следует выбрать узлы продавливания, информация по которым должна попасть в отчет.

В окне предусмотрены следующие опции управления выводом:

- **Для всех узлов** — в отчет попадут все узлы продавливания;
- **Для указанных узлов** — в этом случае в поле ввода нужно ввести номера узлов, для которых следует сформировать отчет.

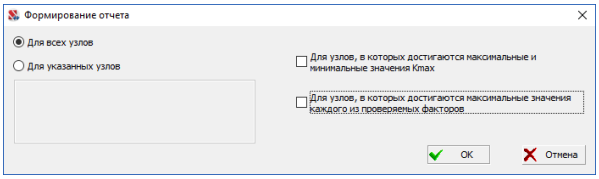



Рис. 19.23-6. *Диалоговое окно* **Формирование отчета**

Кроме того, маркеры **Для узлов, в которых достигаются максимальные и минимальные значения $K_{max}$** и **Для узлов, в которых достигаются максимальные значения каждого из проверяемых факторов** позволяют получить отчет только для узлов, в которых факторы достигают максимума.

## 19.24.Литература к главе Армирование Сечений Железобетонных Элементов


1. Гвоздев А.А., Дмитриев С.А., К расчету предварительно напряженных, обычных железобетонных и бетонных сечений на образование трещин // Бетон и железобетон, 1957, № 5.
2. Залесов А.С., Мухамедиев Т.А., Чистяков Е.А., Расчет трещиностойкости железобетонных конструкций по новым нормативным документам // Бетон и железобетон, 2002, №5.
3. Карпенко Н.И., Теория деформирования железобетона с трещинами. — М.: Стройиздат, 1976.
4. Мурашев В.И., Трещиностойкость, жесткость и прочность железобетона. — М.: Машстройиздат, 1950.
5. Филин А.П., Прикладная механика твердого деформируемого тела. Том II. — М.: Наука, 1978.
6. Карпиловский В.С., Криксунов Э.З., Маляренко А.А., Микитаренко М.А., Перельмутер А.В., Перельмутер М.А., Федоровский В.Г., Юрченко В.В., «SCAD Office. Реализация СНиП в проектирующих программах» — М.: СКАД СОФТ, 2014 — 480с.
7. Мурашев В.И., Сигалов Э.Б., Байков В.Н., Железобетонные конструкции.— М.: Госстройиздат, 1962.

# 20. Проверка несущей способности стальных сечений

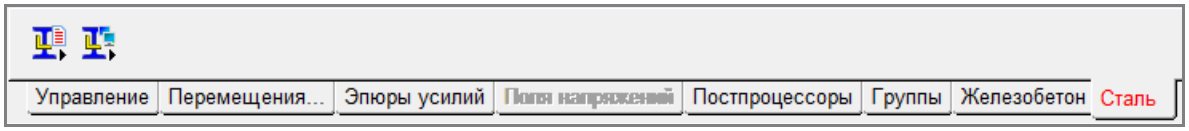
Режим предназначен для **проверки (экспертизы)** несущей способности стержневых элементов стальных конструкций в соответствии с требованиями EN 1993, СНиП II-23-81*, ШНК 2.03.05-13, СП 53-102-2004, СП 16.13330.2011, СП 16.13330.2017, СНиП РК 5.04-23-2002, ДБН В.2.6-163:2010, ДБН В.2.6-198:2014, STR 2.05.08:2005.

В настоящей версии программы поперечные сечения стержней могут быть из прокатных профилей, из сварных двутавровых и коробчатых сечений, заданных как параметрические сечения, а также из сечений произвольной конфигурации, подготовленных с помощью программ **Конструктор сечений**, **Консул** или **ТОНУС**. Режим может использоваться и для **подбора** сечений стержней в тех случаях, когда их поперечные сечения приняты из прокатных профилей или из сварных сечений, представленных в виде сортамента (например, по техническим условиям предприятия).

Управление операциями ввода исходных данных, анализа несущей способности и подбора сечений в элементах стальных конструкций выполняется из раздела инструментальной панели **Сталь**. Элементы управления указанными операциями сосредоточены в двух инструментальных панелях:

 — ввод данных;

 — экспертиза и подбор сечений.




Обязательным условием для работы режима является наличие расчетных сочетаний усилий (РСУ). В противном случае режим будет недоступен. Следует также обратить внимание на соответствие норм, заданных при формировании РСУ, и норм, использованных при анализе элементов стальных конструкций.

### Ввод исходных данных

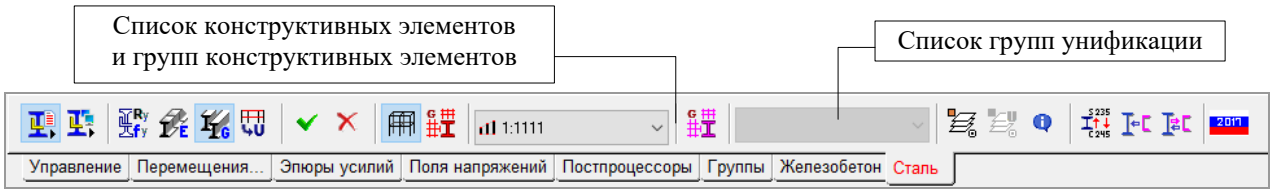



Рис. 20-1. *Инструментальная панель* **Ввод данных** *для расчета несущей способности стальных сечений*

Инструментальная панель **Ввод данных** (рис. 20-1) включает кнопки вызова следующих операций:

 — настройка параметров;

 — назначение конструктивных элементов;

 — назначение групп конструктивных элементов;

 — назначение групп унификации;

 — подтверждение выбора конструктивных элементов;

 — управление группами стальных конструктивных элементов;

 — управление группами унификации;

 — режим визуализации активной группы (здесь как в изображении пиктограммы, так и на схеме используется фиолетовый цвет, в отличие от кнопки выбора группы, где использован — красный);

 — сброс установленного режима;

 — отображение расчетной схемы;

 — селекция элементов, входящих в выбранную группу;

 — смена стали в группах конструктивных элементов;

 — информация о группах стальных конструктивных элементов;

 — визуализация измененных сечений;

 — восстановление исходных сечений;

 — смена норм проектирования.

Проверка несущей способности стальных сечений выполняется для **конструктивных элементов** или **групп конструктивных элементов**.

Конструктивный элемент моделирует физически однородный элемент конструкции — стойку рамы, подкрановую (надкрановую) часть колонны, сплошностенчатый ригель, пояс фермы и т. д.

**Геометрическая длина конструктивного элемента равна сумме длин конечных элементов, его образующих**.

В качестве конструктивного элемента рассматривается непрерывная цепочка стержневых конечных элементов, обладающая следующими свойствами:

- элементы, входящие в цепочку, лежат на одной прямой без разрывов (точность определяется параметром совпадения узлов);
- все элементы цепочки имеют одинаковый тип жесткости;
- все конечные элементы цепочки имеют одинаковый тип;
- у всех элементов цепочки одинаково ориентированы главные оси поперечного сечения;
- элементы цепочки не имеют жестких вставок и шарниров (шарниры допускаются только в начальном и конечном узлах цепочки);
- **элементы цепочки могут входить только в один конструктивный элемент**.

В некоторых случаях **конструктивный элемент может состоять только из одного стержневого конечного элемента**.

Когда необходимо рассмотреть ряд отдельных стержневых конечных элементов (например, стойки или раскосы фермы), то они могут быть объединены в **группы конструктивных элементов**, и проверка несущей способности выполняется для всей конструктивной группы. Обязательным условием для элементов, входящих в группу, является одинаковый тип сечения. Кроме того, для всех элементов конструктивной группы будут использованы одни и те же коэффициенты расчетной длины (или расчетные длины).

Поскольку к конструктивным элементам и группам предъявляются перечисленные выше специальные требования, а контроль их выполняется в процессе назначения и расчета, то в этом случае обычные группы элементов не используются.



**Для всех элементов, входящих в состав конструктивных элементов и групп конструктивных элементов, должны быть вычислены расчетные сочетания усилий (РСУ).**

Конструктивные элементы и группы конструктивных элементов (в дальнейшем — конструктивные группы) могут быть предварительно сформированы как в пре-, так и в постпроцессоре в разделе инструментальной панели **Группы** (операция **Элементы стальных конструкций** —  ). Если при переходе к экспертизе сечений данные ранее сформированных конструктивных групп не требуют корректировки, режим ввода можно пропустить и сразу перейти к анализу сечений. В противном случае создание и/или корректировка конструктивных групп выполняется в разделе **Ввод данных** инструментальной панели **Сталь**.

## 20.1. Настройка параметров



Начальная установка параметров выполняется в диалоговом окне **Параметры настройки** (рис. 20.1-1). Введенные в окне данные автоматически присваиваются всем вновь создаваемым конструктивным элементам и группам конструктивных элементов. В тех случаях, когда конструктивный элемент или группа имеют значения параметров настройки отличные от заданных в окне, эти параметры назначаются в диалоговых окнах **Конструктивный элемент** или **Группа конструктивных элементов**.

По умолчанию приняты: коэффициент условий работы — 1.0, предельная гибкость сжатых элементов — 180, предельная гибкость растянутых элементов — 300. При назначении коэффициент условий работы задается в интервале 0.7…1.2.

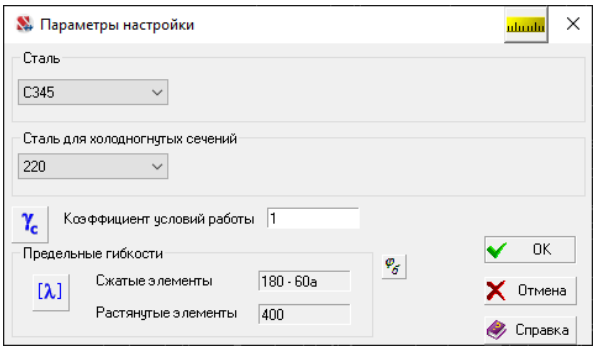



Рис. 20.1-1. *Диалоговое окно*
**Параметры настройки**

### Стали

Сталь выбирается из одноименного списка. Если по каким-либо соображениям необходимо задать нестандартное значение расчетного сопротивления, то в списке сталей следует установить строку **Другая** (сталь) и ввести значение $\mathbf{R_y}$ в поле ввода. В этом случае расчетное сопротивление не будет зависеть от вида и толщины проката.

Аналогично выбирается сталь для холодногнутых профилей.

## Коэффициенты условий работы

Нажатие кнопки  приводит к появлению диалогового окна (рис. 20.1-2), в котором можно выбрать стандартное (оговоренное нормами) значение коэффициента условий работы и нажатием кнопки **Применить**, перенести это значение в поле ввода.

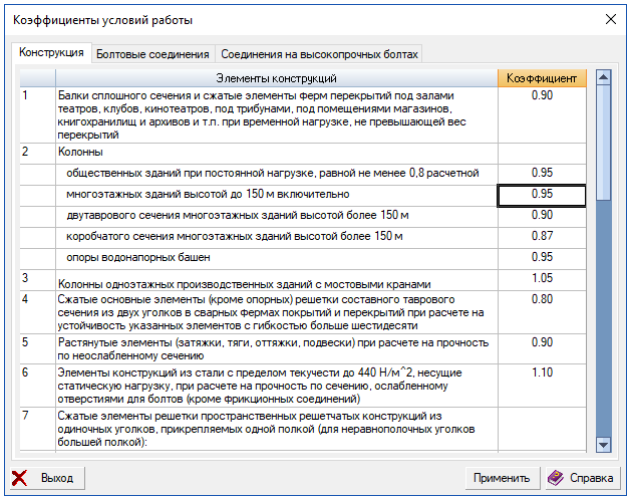



Рис. 20.1-2. *Диалоговое окно* **Коэффициенты условий работы**

Если в качестве норм проектирования стальных конструкций выбран EN 1993, то данный элемент управления отсутствует.

## Предельные гибкости

Кнопка  позволяет активировать диалоговое окно (см. рис. 20.1-3), в котором можно выбрать стандартное (оговоренное нормами) значение предельной гибкости и нажатием кнопки **Применить** перенести это значение в поле ввода.

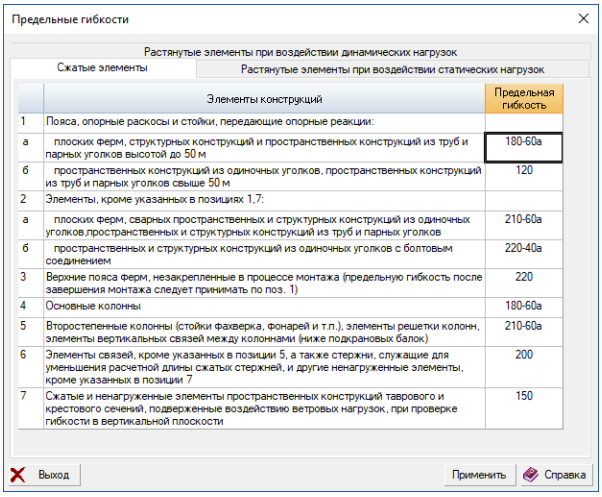



Рис. 20.1-3. *Диалоговое окно* **Предельные гибкости**

Если в качестве норм проектирования стальных конструкций выбран EN 1993, то данный элемент управления отсутствует.

### Формирование новых конструктивных групп

При подготовке новых конструктивных групп рекомендуется придерживаться следующего порядка работы:

- выбрать на схеме (отметить) элементы, входящие в конструктивную группу;
- в разделе **Сталь** инструментальной панели выбрать операцию **Ввод данных** —  , после чего появится инструментальная панель подготовки исходных данных для анализа элементов стальных конструкций;
- нажать одну из кнопок, соответствующую типу создаваемой группы:
-  — **Назначение конструктивных элементов**;
-  — **Назначение групп конструктивных элементов**.
- нажать кнопку  — **Подтверждение** в инструментальной панели;
- в появившемся диалоговом окне **Конструктивный элемент** (рис. 20.1-1) или **Группы конструктивных элементов для проверки сечений** задать параметры группы.

## 20.2. Назначение новых конструктивных элементов



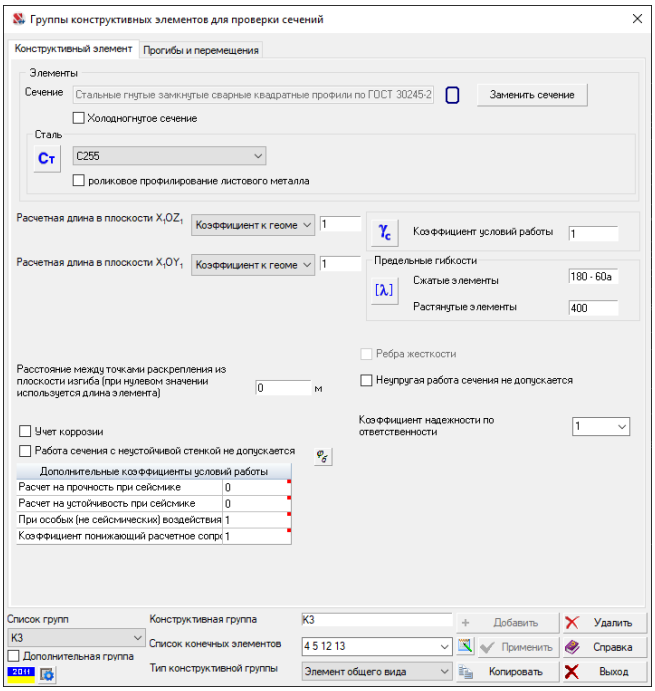



Рис. 20.2-1. *Диалоговое окно* **Конструктивный элемент**

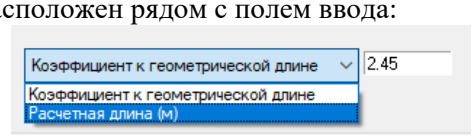
В диалоговом окне **Конструктивный элемент** задаются характеристики элемента: имя элемента (задание обязательно), тип конструктивного элемента, коэффициенты расчетной длины, расстояние между точками раскрепления из плоскости изгиба, коэффициент надежности по ответственности, а также сталь, коэффициенты условий работы и предельные гибкости (по умолчанию три последних параметра соответствуют назначенным в окне **Параметры настройки**). Если эти параметры были изменены, то конструктивный элемент будет иметь характеристики, отличные от назначенных для всей схемы.

### Расчетные длины

Коэффициенты расчетной длины являются множителями к геометрической длине конструктивного элемента и служат для определения расчетных длин конструктивного элемента (физически однородного стержня) в плоскостях главных осей инерции поперечного сечения. При их

назначении следует исходить из расстояния между точками закрепления элемента в реальной конструкции и характера этого закрепления (жесткая или упругая опора, препятствие угловым или линейным перемещениям).

В программе предусмотрено задание информации либо в виде коэффициента расчетной длины, либо в виде расчетной длины. Переключение способа ввода данных осуществляется с помощью выпадающего списка, который расположен рядом с полем ввода:




## Критический момент

При расчетах по EN 1993 и СП 2601325800 на отдельной странице следует задать данные для определения критического момента (рис. 20.2-2). Вычисление критического момента выполняется с использованием аналитического решения, приведенного в Annex F ENV 1993-1-1 и СП 260.1325800, в зависимости от формы эпюры изгибающего момента, различных условий закреплений концов стержневого элемента, раскрепления от искажения, уровня приложения нагрузки по отношению к центру сдвига сечения, а также в зависимости от асимметрии сечения относительно оси большей жесткости. Кроме того, при вычислении критического момента учитывается кривизна в плане до потери устойчивости в соответствии с *Руководство для проектировщиков к Еврокод 3: Проектирование стальных конструкций EN 1993-1-1, EN 1993-1-3, EN 1993-1-8*: пер. с англ. – М.: МГСУ, 2012.

Вычисления выполняются только для поперечных сечений симметричных относительно оси меньшей жесткости при их изгибе относительно оси большей жесткости.

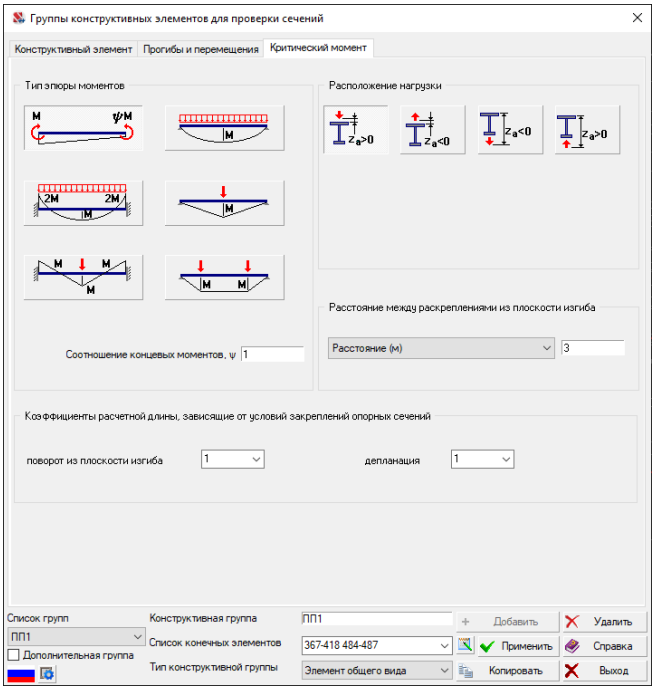



Рис. 20.2-2. *Диалоговое окно* **Критический момент**

Кроме того, нормы ограничивают использование этого метода проверки для тех сечений, для которых характерен существенный поворот главных осей инерции «эффективного» сечения по отношению к главным осям инерции поперечного сечения брутто.

Соответствующие ограничения введены и в программе. Так, если пользователем выбрано сечение, не удовлетворяющее требованиям симметрии относительно оси меньшей жесткости при его изгибе относительно оси большей жесткости, то предполагается, что устойчивость плоской

формы изгиба рассматриваемого стержневого элемента обеспечена соответствующими раскреплениями.

В группе **Тип эпюры моментов** с помощью кнопок пользователю предоставлена возможность определить тип эпюры изгибающего момента для стержневого элемента. Поскольку нормы СП 260.1325800 ограничили расчетную методику определения критического момента только четырьмя типами эпюр изгибающих моментов, то при проектировании по СП 260.1325800 в данной группе отображается только четыре соответствующие кнопки.

Если выбран первый вариант эпюры изгибающих моментов, то следует также задать параметр $\psi$, характеризующий соотношение концевых моментов. В поле **l/L для сжатого пояса** необходимо ввести коэффициент расчетной длины для проверки устойчивости плоской формы изгиба. Кроме того, задается расстояние от точки приложения нагрузок до уровня верхнего пояса $z_a$. Знак $z_a$ назначается в соответствии с приведенной на странице схемой.

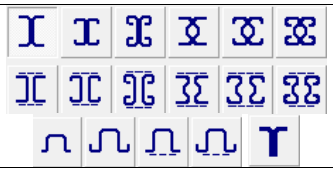
Кроме того, для вычисления критического момента следует задать два коэффициента эффективной длины, зависящие от закрепления торцевых сечений: коэффициент $k$, зависящий от поворота торцевых сечений, и коэффициент $k_w$, который характеризует ограничение депланаций сечения. Рекомендации по назначению коэффициентов $k$, $k_w$ для некоторых частных случаев можно найти в книгах:

L. Gardner, *Stability of Steel Beams and Columns: In Accordance with Eurocodes and the UK National Annexes*, Steel Construction Institute, 2011.

N.Boissonnade, R.Greiner, J.P.Jaspart, J.Lindner, *Rules for member stability in EN 1993-1-1 : Background documentation and design guidelines*, ECCS European Convention for Constructional Steelwork, 2006.

Реализация проверки устойчивости плоской формы изгиба зависит от типа поперечного сечения стержневого элемента (табл. 20.2.2).

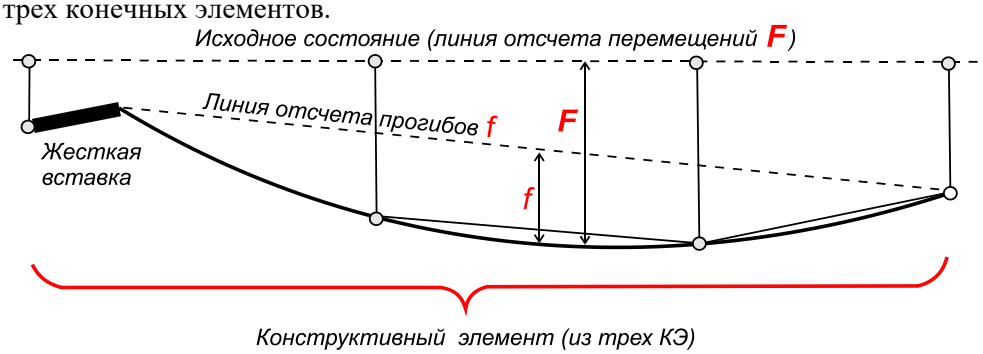
**Таблица 20.2.2. Реализация проверки устойчивости плоской формы изгиба для стержневых элементов с различными типами сечений**

| Тип поперечного сечения стержневого элемента | Реакция режима **Критический момент** на тип поперечного сечения |
|---|---|
|  | Предполагается, что устойчивость плоской формы изгиба обеспечена соответствующими закреплениями сжатого пояса изгибаемого элемента |
|  | Расчет устойчивости плоской формы изгиба выполняется |
|  | Нормы не содержат рекомендации по вычислению критического момента и, соответственно, по проверке несущей способности на потерю устойчивости плоской формы изгиба |
|  | Предполагается, что потери устойчивости плоской формы изгиба не происходит |

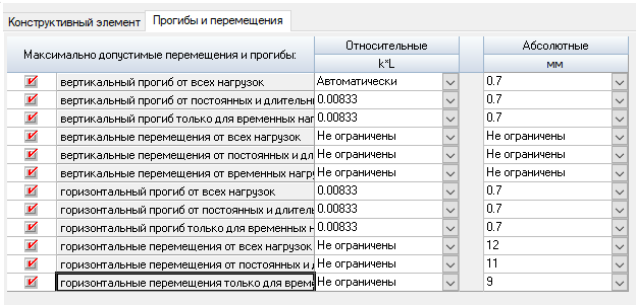
## Учет максимально допустимых прогибов и перемещений

Учет максимально допустимых горизонтальных и вертикальных прогибов и перемещений выполняется в соответствии с рекомендациями выбранного для расчета нормативного документа. Например, в случае использования СП 20.13330.2011 проверки выполняются в соответствии с разделом Е.2.1 Приложения Е, а при работе с ДСТУ Б.В.1.2-3:2006 (Прогибы и перемещения) — в соответствии с пунктом 5.1 раздела 5.

Линией отсчета прогибов считается прямая, которая соединяет начало и конец гибкой части конструктивного элемента. Ниже на рисунке показан пример, в котором конструктивный элемент состоит из трех конечных элементов.




Проверка выполняется на основе параметров, выбираемых из соответствующей таблицы на странице **Прогибы и перемещения**.


Конструктивный элемент | Прогибы и перемещения

| Максимально допустимые перемещения и прогибы: | Относительные k*L | Абсолютные мм |
|---|---|---|
| вертикальный прогиб от всех нагрузок | Автоматически | 0.7 |
| вертикальный прогиб от постоянных и длительны | 0.00833 | 0.7 |
| вертикальный прогиб только для временных наг | 0.00833 | 0.7 |
| вертикальные перемещения от всех нагрузок | Не ограничены | Не ограничены |
| вертикальные перемещения от постоянных и дл | Не ограничены | Не ограничены |
| вертикальные перемещения от временных нагр | Не ограничены | Не ограничены |
| горизонтальный прогиб от всех нагрузок | 0.00833 | 0.7 |
| горизонтальный прогиб от постоянных и длител | 0.00833 | 0.7 |
| горизонтальный прогиб только для временных н | 0.00833 | 0.7 |
| горизонтальные перемещения от всех нагрузок | Не ограничены | 12 |
| горизонтальные перемещения от постоянных и д | Не ограничены | 11 |
| горизонтальные перемещения только для врем | Не ограничены | 9 |

Предусмотрена возможность задания как относительных, так и абсолютных значений допустимых прогибов и перемещений. В первом случае рассматриваются следующие варианты учета перемещений (выбор варианта выполняется из выпадающего списка, соответствующей графы таблицы учета вертикальных перемещений):

- **Не ограничены** — прогибы и перемещения не учитываются при проверке;
- **Автоматически** — относительные (по отношению к длине конструктивного элемента) прогибы и перемещения, вычисляемые программно в зависимости от длины элемента; диапазон длин и соответствующие предельные перемещения определены нормативным документом;
- предельное значение выбирается из списка.

Абсолютные значения задаются пользователем или не учитываются, если выбран вариант «**Не ограничены**».

Если заданы одновременно и относительные и абсолютные ограничения, то при вычислении коэффициента использования ограничений принимается во внимание значение, дающее больший по величине коэффициент.

Необходимо отметить, что автоматическая проверка по относительному значению имеет смысл лишь в тех случаях, когда конструктивный элемент не имеет связей в пролете между концевыми узлами.

Учитывая тот факт, что существуют ситуации, когда конструктора интересуют прогибы и перемещения, вызываемые только переменными воздействиями (например, проверка зыбкости конструкции, или же случай, когда перемещения от действия собственного веса парированы строительным подъемом) в программе предусмотрена возможность выполнить проверки как для всех нагрузок, так и отдельно только для временных. Выбор вида расчета выполняется путем активации маркера в соответствующих строках и расчетных сочетаний. В любом случае проверки выполняются с учетом расчетных сочетаний прогибов и перемещений, полученных на основе нормативных (характеристических) значений нагрузок.



**Учет максимально допустимых перемещений и прогибов выполняется только в режиме экспертизы и не используется при подборе сечений.**

## Коэффициенты надежности по ответственности

Во всех расчетных режимах требуется задание информации о коэффициенте надежности по ответственности согласно выбранным нормам по надежности (ГОСТ 27751-88, ГОСТ 27751-2014, ДБН В.1.2-14-2009, …).

При расчете используются три коэффициента надежности по ответственности:

- для первого предельного состояния $\gamma_n$;
- для второго предельного состояния;
- для аварийного/особого состояния (используется также при анализе прогрессирующего обрушения и огнестойкости).

Коэффициент $\gamma_n$ может быть выбран из выпадающего списка в соответствии с характеристикой объекта строительства (объект *повышенной*, *нормальной* или *пониженной* ответственности) или введен пользователем (в нестандартных ситуациях).

ДБН В.1.2-14-2009 предусматривает три коэффициента надежности по ответственности (для первого предельного состояния, второго предельного состояния и аварийных ситуаций). Пользователь может задать каждый из этих трех коэффициентов. В ГОСТ 27751-88 предусмотрен только один коэффициент и этот коэффициент используется программой во всех расчетных ситуациях. Если в качестве норм по надежности выбран ГОСТ 27751-2014, то заданный пользователем коэффициент $\gamma_n$ используется при расчетах по первому предельному состоянию. При расчетах по второму предельному состоянию полагается $\gamma_n$=1.0 (чтобы избежать ситуации, при которой нормативные значения оказываются больше расчетных этот коэффициент, принимается не более чем $\gamma_n$ для первого предельного состояния). При анализе особых расчетных ситуаций используется $\gamma_n$=1.0 (см. п. 5.5 СП 296.1325800.2017).

## Замена сечения конструктивного элемента

Для замены сечения элементов, входящих в конструктивный элемент, используется кнопка **Заменить сечение**.

В последнем случае проверка несущей способности будет выполняться для сечения, отличного от заданного в жесткостных характеристиках **(автоматический пересчет измененной схемы не выполняется!**). Кроме того, следует помнить и об унификации, так как этот элемент мог входить в одну из унифицированных групп.

## Тип конструктивного элемента

Предусмотрена возможность назначения конструктивным элементам следующих типов:

- элемент общего вида (или стойка);
- балка (элемент, подверженный одноосному изгибу относительно оси Y);
- элемент фермы;
- элемент пояса фермы;
- элемент решетки фермы;
- опорный раскос фермы;
- опорная стойка фермы.

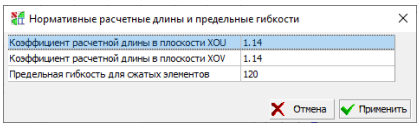
Если сечением является одиночный уголок, то дополнительно предоставляется возможность указать следующие типы конструктивных элементов:

- пояс пространственной решетчатой конструкции с совмещенными в смежных гранях узлами;

- пояс пространственной решетчатой конструкции с несовмещенными в смежных гранях узлами;
- элемент решетки пространственной решетчатой конструкции;
- элемент структурной конструкции.

Программа автоматически на основании выбранного типа будет производить анализ устойчивости в главных или конструктивных осях в соответствии с требованием выбранных норм проектирования.

Кроме того, нажатие кнопки  активируется диалоговое окно, в котором указаны регламентируемые нормами значения расчетных длин и предельных гибкостей. При нажатии кнопки **Применить** эта информация переносится в параметры расчета.




Набор сечений, для которых выполняется экспертиза, зависит от типа конструктивного элемента и представлен в таблице 20.2.2.

**Таблица 20.2.2.**

| **Вид элемента** | **Набор сечений** | **Внутренние усилия, учитываемые при расчете** |
|---|---|---|
| Элемент общего вида |  | $N$, $M_y$, $Q_z$, $M_z$, $Q_y$ |
| Стойка | | |
| Балка |  | $M_y$, $Q_z$ |
| Элемент фермы |  | $N$ |
| Элемент решетки фермы |  | $N$ |
| Элемент пояса фермы | | |
| Опорный раскос фермы | | |
| Опорная стойка фермы | | |

Выбор типа влияет на набор данных, которые должны быть заданы для элемента. Например, для элементов ферм не требуется информация о предельных гибкостях (эти данные оговорены СНиП); для балок не нужна информация о расчетных длинах и т. д. Тип определяет не только набор проверок по СНиП, но и влияет на то, какие усилия будут приняты во внимание при проведении экспертизы сечений. Например, для балок будет проигнорирована продольная сила, даже в том случае, когда это усилие возникло при расчете. В конструктивных элементах типа «Элемент решетки фермы», «Элемент пояса фермы», «Опорный раскос фермы» и «Опорная стойка фермы» наличием изгибающих моментов пренебрегают, полагая, что стержневой элемент работает в составе шарнирно-стержневой статически определимой системы – фермы, но специальный маркер позволяет также учесть действие изгибающих моментов и поперечных сил. В этом случае расчет аналогичен расчету элемента общего вида, но расчетные длины и предельные гибкости выбираются автоматически в соответствии с рекомендациями норм для элементов ферм.

Для элементов общего вида и балок следует задать *расстояние между точками раскрепления из плоскости изгиба* (именно эта величина будет использована при анализе устойчивости плоской формы изгиба). Если данная величина задана равной нулю, то будет использована геометрическая длина элемента. Если в качестве норм проектирования стальных конструкций выбран EN 1993, то данный элемент управления отсутствует.

Для тех типов поперечных сечений, для которых возможна установка поперечных ребер жесткости, можно использовать маркер **Ребра жесткости**, указав тем самым, что ребра установлены, а также задать их шаг. Если заданный пользователем шаг поперечных ребер жесткости превышает длину элемента, анализ местной устойчивости стенки элемента выполняется как для неоребренной стенки. В том случае, когда гибкость стенки элемента такова, что элемент классифицируется как элемент с гибкой стенкой, выводится фактор «Соотношение высоты стенки к ее толщине» со значением, превышающим 1,0. Расчет элементов с гибкой стенкой в программе не реализован ввиду крайне ограниченной области применения методики расчета таких конструкций (только для разрезных балок, несущих статическую нагрузку).

Для элементов общего вида, воспринимающих продольную силу и изгибающий момент, нормы проектирования стальных конструкций предлагают две возможные проверки на прочность:

- с учетом возможной работы в упругопластической стадии;
- при отсутствии неупругой работы.

При этом возможность работы в упругопластической стадии ограничена рядом условий, например таких, как отсутствие непосредственного воздействия динамических нагрузок. В случае, когда имеется непосредственное воздействие динамических нагрузок, а также в тех случаях, когда пользователь по каким-то иным причинам не желает выйти за пределы упругой работы, предусмотрен маркер **Неупругая работа сечения не допускается**. Автоматический отказ от расчета в упругопластической стадии при наличии в РСУ динамических загружений не предусмотрен, поскольку СНиП не содержит четкого определения понятия "непосредственное воздействие динамических нагрузок". Если в качестве норм проектирования стальных конструкций выбран EN 1993, то данный элемент управления отсутствует, а соответствующая опция может быть выбрана в настройках на странице **Настройки EN 1993** (см. раздел 35.7).

Маркер **Потеря устойчивости стенки не допускается** служит для выполнения проверочного расчета сечения с учетом его закритической работы (после потери местной устойчивости стенки). Отмеченный маркер позволяет пользователю отказаться от закритической работы сечения в случае, если по результатам проверки происходит потеря местной устойчивости стенки.

Для конструктивных элементов типа **Балка**, воспринимающих только изгибающий момент и поперечную силу, нормы проектирования регламентируют выполнять проверку прочности и устойчивости плоской формы изгиба в зависимости от класса балки:

– для сечений балок 1-го класса – в границах упругих деформаций стали;

– для сечений балок 2-го класса – в границах упругопластических деформаций стали.

При этом возможность работы в упругопластической стадии для балок ограничена типом расчетной схемы балки – работа в границах упругопластических деформаций стали регламентирована нормами только для разрезных балок. В том случае, когда маркер **Разрезная** отмечен пользователем и по результатам анализа нормальных напряжений в сечении оно отнесено к сечениям 2-го класса, проверка прочности и устойчивости плоской формы изгиба таких балок будет выполнена с учетом упруго-пластических деформаций. Если же пользователь по каким-либо причинам не желает выйти за пределы упругой работы стали, предусмотрен маркер **Неупругая работа сечения не допускается**. Если в качестве норм проектирования стальных конструкций выбран EN 1993, то маркер **Разрезная** отсутствует.

Поскольку разные группы элементов могут иметь различную степень ответственности, то коэффициенты надежности по ответственности назначаются при создании конструктивного элемента и могут отличаться у конструктивных элементов.

После ввода всех данных о конструктивном элементе, включая имя элемента, следует нажать кнопку **Добавить**.

## Учет коррозии

Предусмотрена возможность выполнять проверочные расчеты с учетом коррозии. Для этого следует активировать соответствующий маркер и задать толщину слоя коррозии. При выполнении расчетов предполагается, что толщина слоя коррозии одинакова по всему периметру сечения. Учет коррозии, естественно, не производится при подборе сечений. Если в качестве норм проектирования стальных конструкций выбран EN 1993, то данная возможность отсутствует.

## Дополнительные настройки

Рядом с иконкой, которая указывает на выбранные нормы проектирования, расположена кнопка  , которая позволяет активизировать специальное диалоговое окно для задания дополнительных ограничений, которые должны быть использованы при подборе сечений стальных элементов (рис. 20.2-3).

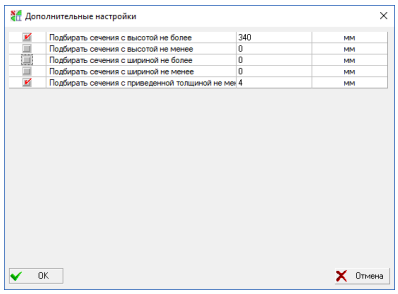



Рис. 20.2-3. *Диалоговое окно* **Дополнительные настройки**

В частности, в этом окне можно задать ограничения на высоту сечения, ширину сечения и приведенную толщину (если заказан режим анализа огнестойкости).

Поскольку изменение № 1 к ДБН В.2.6-198:2014 сделало проверку гибкости необязательной, то при расчете по этим нормам появляется дополнительная опция, позволяющая отказаться от этих проверок.

При расчетах по EN 1993 доступна опция **Контроль гибкости сжатых элементов**. Эта опция предназначена для того, чтобы программа производила анализ гибкости сжатых элементов. После активации этого маркера можно указать величину предельно допустимой гибкости (по умолчанию 200).

При расчете на действие особых загружений по умолчанию используются нормативные, а не расчетные свойства материалов (см. п. 5.6 СП 296.1325800.2017). Поскольку данный пункт был исключен Изменением № 2 к СП 296.1325800.2017, пользователь может (используя соответствующий маркер) сам выбрать, какие свойства материалов (расчетные или нормативные) использовать.

## Копирование параметров конструктивных элементов

Если новый конструктивный элемент имеет все или большинство параметров, совпадающих с ранее созданным элементом, то предусмотрена возможность копирования свойств существующего элемента и присвоение их новому. Для копирования следует выполнить такие действия:

- активировать операцию создания конструктивного элемента;
- выбрать на схеме конечные элементы, составляющие новый конструктивный элемент;
- нажать кнопку **Подтверждение** в инструментальной панели;
- в диалоговом окне **Конструктивный элемент** нажать кнопку **Копирование** и выбрать из появившегося списка элемент, параметры которого копируются;
- уточнить, если это необходимо, параметры нового элемента, включая его имя;
- нажать кнопку **Добавить** (новый элемент);
- выйти из диалогового окна нажатием на кнопку **Применить**.

Операция **Копирование** будет доступна, если в схеме есть ранее созданные конструктивные элементы.

### Контроль конструктивных элементов

Перед включением нового конструктивного элемента в список конструктивных элементов, подлежащих проверке, выполняется контроль корректности назначения. Если в результате контроля обнаружено, что выбранные элементы не соответствуют перечисленным выше требованиям к конечным элементам, составляющим конструктивный элемент, то появляется диалоговое окно **Результат выполнения операции** (рис. 20.2-4).

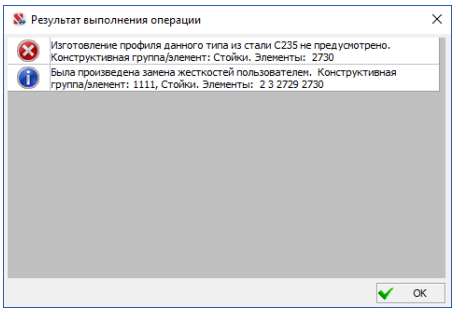



Рис. 20.2-4. *Диалоговое окно* **Результат выполнения операции**

В списке возможных ошибок, приведенном в этом окне, доступными будут те опции, которые указывают на ошибки, допущенные при назначении конструктивного элемента. После закрытия этого окна все сообщения появятся в журнале с указанием номеров элементов схемы, в которых были допущены ошибки. Используя кнопки селекции, установленные в журнале, можно выполнить визуализацию элементов на схеме или их селекцию.

## 20.3. Назначение групп конструктивных элементов



В тех случаях, когда конструктивный элемент содержит только один стержень, есть возможность объединить такие стержни в группы и выполнять проверку, а при необходимости и унификацию на уровне групп. Операции по назначению групп конструктивных элементов и заданию их характеристик аналогичны описанным выше для конструктивных элементов.

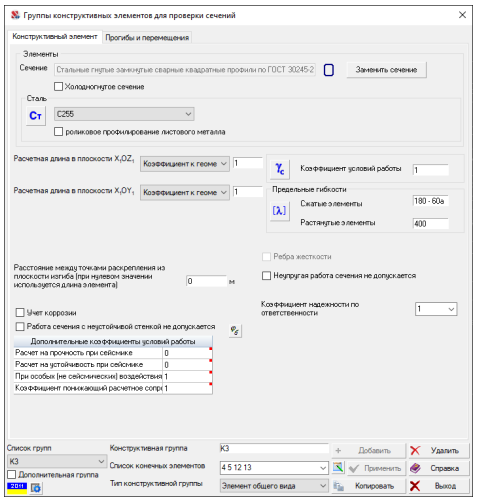



Рис. 20.3-1. *Диалоговое окно* **Группы конструктивных элементов для проверки сечений**

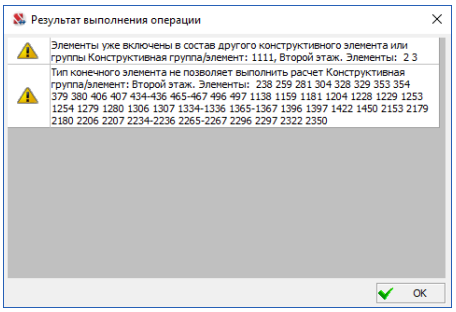



Рис. 20.3-2. *Диалоговое окно* **Результат выполнения операции**

Характеристики групп задаются в диалоговом окне **Группы конструктивных элементов для проверки сечений** (рис. 20.3-1) аналогичным окну для создания конструктивного элемента.

Следует помнить, что замена сечения выполняется для всех конструктивных элементов группы. Таким образом, после выполнения этой операции все конструктивные элементы группы будут иметь одинаковое сечение.

При обнаружении ошибок, допущенных при создании группы конструктивных элементов, после нажатия кнопки **Добавить** появляется диалоговое окно с перечнем ошибок (рис. 20.3-2). Правила работы с этим окном такие же, как и правила работы с окном ошибок для конструктивных элементов.

### Учет максимально допустимых перемещений

Учет максимально допустимых вертикальных перемещений для групп конструктивных элементов выполняется по тем же правилам, что и для конструктивных элементов (раздел 20.2). Отличие состоит в том, что максимальное значение перемещений выбирается для каждого конечного элемента, входящего в группу, путем анализа значений перемещений узлов и прогибов.

## 20.4. Корректировка параметров конструктивных элементов и групп конструктивных элементов

Любые из первоначально заданных параметров конструктивных элементов или групп конструктивных элементов (включая состав входящих в них конечных элементов) могут быть изменены в процессе экспертизы и подбора.

Если изменения касаются состава и параметров конструктивного элемента или группы, то после внесения изменений следует нажать кнопку **Применить**, стоящую справа от списка конструктивных элементов или их групп. При замене сечения используется кнопка **Заменить сечение**, о которой уже говорилось выше.

Изменения в составе конструктивных элементов или их групп выполняются аналогично заданию. Для этого следует:

- выбрать в списке инструментальной панели **Ввод данных** имя корректируемого элемента или группы;
- нажать кнопку **Выбрать активную группу** —  , после чего конечные элементы, входящие в состав конструктивного элемента или группы, будут выбраны и отмечены красным цветом;
- указанием курсора пометить конечные элементы, исключаемые из состава конструктивной группы (с этих элементов будет снят признак выбора);
- нажать кнопку **Подтверждение** —  инструментальной панели, после чего появится соответствующее диалоговое окно (**Конструктивный элемент** или **Группы конструктивных элементов…**);
- нажать кнопку **Применить** в появившемся диалоговом окне.

Аналогично выполняется и добавление конечных элементов в состав ранее созданного конструктивного элемента.

Для редактирования существующего списка группы используется одноименная кнопка  , нажатие которой приводит к появлению диалогового окна со списком элементов.

В нижней части диалогового окна (рис. 20.4-1) расположен список *конечных элементов*, в котором перечислены номера элементов, входящих в конструктивный элемент или группу. Этот список можно откорректировать непосредственно в окне. Если при этом на схеме есть выбранные элементы, то с помощью набора операций, который открывается нажатием кнопки  , стоящей справа от списка, можно произвести следующие действия:

- **Создать список элементов по отмеченным элементам**, т. е. фактически заменить, ранее сформированный список элементов, на список из выбранных на схеме элементов;
- **Создать список по данным группы и отмеченным элементам**, т. е. добавить, в ранее сформированный список элементов, выбранные на схеме элементы;
- **Создать список по данным группы, исключив отмеченные элементы**, т. е. исключить из списка, ранее сформированной группы, выбранные на схеме элементы.

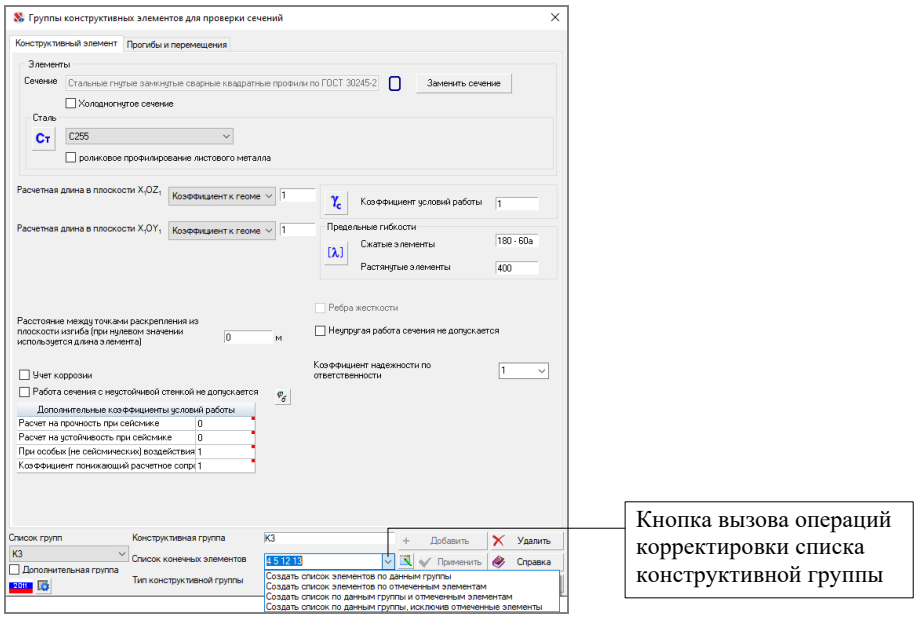



Рис. 20.4-1. *Корректировка списка элементов, входящих в конструктивную группу*

Если после манипуляций со списком элементов (до использования кнопки **Применить**) необходимо вернуться к его начальному состоянию, то следует воспользоваться первой операцией в рассматриваемом списке — **Создать список элементов по данным группы**, после выполнения которой будет восстановлен исходный список группы.

Для удаления конструктивного элемента или группы конструктивных элементов следует выбрать имя из списка инструментальной панели **Ввод данных** и нажать кнопку  . В появившемся диалоговом окне нажать кнопку **Удалить**.

Если удаляется несколько объектов, следует выполнить описанные выше операции для одного объекта, а затем, не выходя из диалогового окна, последовательно выбирать из списка конструктивных элементов (или групп) удаляемые объекты и нажимать кнопку **Удалить**.

### Копирование параметров групп конструктивных элементов

Если новая группа конструктивных элементов имеет все или большинство параметров, совпадающих с ранее созданной группой, то предусмотрена возможность копирования свойств существующей группы и присвоение их новой. Для копирования следует выполнить такие действия:

- активировать операцию создания группы конструктивных элементов;
- выбрать на схеме конечные элементы, составляющие новую группу;
- нажать кнопку **Подтверждение** в инструментальной панели;
- в диалоговом окне **Группы конструктивных элементов…** нажать кнопку **Копирование** и выбрать из появившегося списка группу, параметры которой копируются;
- уточнить, если это необходимо, параметры новой группы, включая ее имя;
- нажать кнопку **Добавить** (новую группу);
- выйти из диалогового окна нажатием на кнопку **Применить**.

Операция **Копирование** будет доступна, если в схеме есть ранее созданные группы конструктивных элементов.

## 20.5. Основные и дополнительные группы

Если некоторый конечный элемент одновременно принадлежит нескольким конструктивным элементам (или группам конструктивных элементов), то это порождает многочисленные проблемы и вопросы. Например, если выполнить подбор сечений, то результаты какой группы следует считать результатом подбора? Какие результаты следует использовать при назначении жесткостей по результатам подбора? На основании каких данных вычислять величину $K_{max}$ после проведения

экспертизы при отображении коэффициента использования ограничений для всей схемы, а не для отдельного конструктивного элемента?

В то же время, в некоторых случаях удобно иметь возможность создать несколько конструктивных элементов (или групп), которые имеют один и тот же набор конечных элементов, но различаются параметрами (например, маркой стали или коэффициентами условий работы). Это позволяет произвести сравнение результатов, используя многооконный режим, и принять обоснованное решение.

Для реализации такой возможности предусмотрено создание конструктивных групп, имеющих признак **Дополнительная группа** (рис. 20.5-1). Этот признак присваивается при создании группы и позволяет работать с набором конструктивных групп, имеющих совпадающие все или несколько конечных элементов. При использовании основных и дополнительных групп имеются следующие ограничения:

- конечный элемент не может одновременно принадлежать двум основным группам;
- дополнительные группы не используются при определении $K_{max}$ для всей схемы;
- дополнительные группы не используются при назначении жесткостей по результатам подбора;
- если конечный элемент одновременно принадлежит основной и дополнительной группе/ группам, то в информации об элементе при нажатии кнопок **Сталь**. **Факторы**, **Сопротивление сечений**, ... появляется меню с перечнем групп, из которого и выбирается группа для отображения результатов;
- дополнительные группы не используются при расчете прогрессирующего обрушения;
- дополнительные группы не используются при формировании технической спецификации стали.

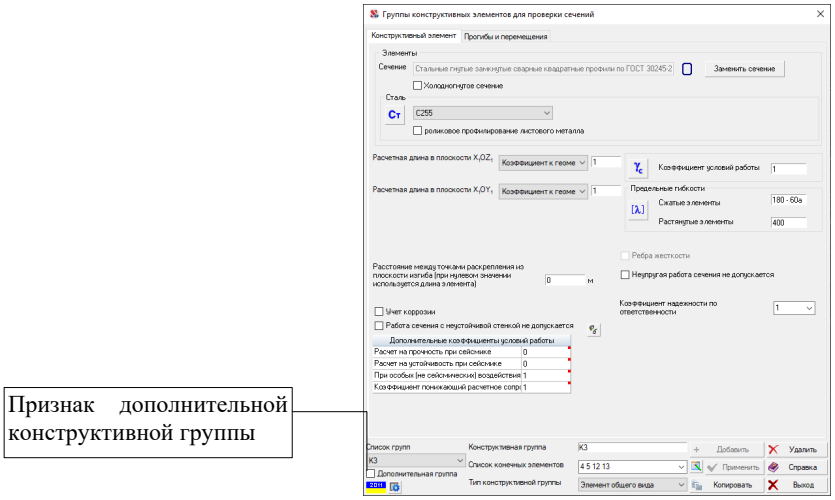



Рис. 20.5-1. *Диалоговое окно* **Группы конструктивных элементов для проверки сечений** *(дополнительная группа)*

В списках конструктивных групп в инструментальных панелях и диалоговых окнах дополнительные группы отмечаются зеленым фоном пиктограмм. При создании основных и дополнительных групп желательно обеспечивать уникальность их имен.

## 20.6. Расчет холодногнутых профилей

Если та или иная группа состоит из элементов из холодногнутых профилей, то для расчета следует включить маркер **Холодногнутое сечение**. В этом случае если в качестве норм проектирования стальных конструкций выбран EN 1993, то расчет элементов этой группы будет произведен на основании требований EN 1993-1-3. Если же нормами проектирования стальных конструкций являются, например, СП 16.13330, то расчет холодногнутых сечений будет произведен согласно СП 260.1325800.

Для данного типа профилей можно также использовать маркеры **Закреплено от кручения** и **Депланации не стеснены**. При выборе первой опции предполагается, что элемент по всей длине надежно раскреплен связями от кручения, и при расчете не будет учитываться крутящий момент (в том числе кручение, обусловленное действием поперечной силы при эксцентриситете центра изгиба относительно центра масс). При выборе второй опции предполагается, что опорные сечения элемента свободно депланируют, вследствие чего при расчете не будет учитываться бимомент и момент стесненного кручения.

Для элементов из холодногнутых профилей производятся следующие проверки:

| Фактор | Ссылка на EN 1993-1-1 | Ссылка на EN 1993-1-3 | Ссылка на СП 260.1325800 |
|---|---|---|---|
| Прочность при действии продольной силы растяжения N | п. 6.2.3 (6.5) | п. 6.1.2 (6.1) | п. 7.7.2.1 (7.68) |
| Прочность при действии продольной силы сжатия N | п. 6.2.4 (6.9) | п. 6.1.3 (6.3) | п. 7.7.2.2 (7.69) |
| Прочность при действии продольной силы N с учетом потери местной устойчивости | п. 6.2.4 (6.9) | п. 6.1.3 (6.2) | п. 7.7.2.2 (7.69) |
| Прочность при действии изгибающего момента $M_y$ с учетом пластических деформаций стали | п. 6.2.5 (6.12) | п. 6.1.4 (6.5) | не вычисляется |
| Прочность при действии изгибающего момента $M_y$ в границах упругих деформаций стали | п. 6.2.5 (6.12) | п. 6.1.4 (6.6) | п. 7.7.3 (7.75) |
| Прочность при действии изгибающего момента My с учетом потери местной устойчивости | п. 6.2.5 (6.12) | п. 6.1.4 (6.4) | п. 7.7.3 (7.74) |
| Прочность при действии изгибающего момента $M_z$ с учетом пластических деформаций стали | п. 6.2.5 (6.12) | п. 6.1.4 (6.5) | не вычисляется |
| Прочность при действии изгибающего момента $M_z$ в границах упругих деформаций стали | п. 6.2.5 (6.12) | п. 6.1.4 (6.6) | п. 7.7.3 (7.75) |
| Прочность при действии изгибающего момента $M_z$ с учетом потери местной устойчивости | п. 6.2.5 (6.12) | п. 6.1.4 (6.4) | п. 7.7.3 (7.74) |
| Прочность при одновременном действии изгибающих моментов $M_y$ и $M_z$ с учетом пластических деформаций стали | | п. 6.1.4 (6.5), (6.7) | не вычисляется |
| Прочность при одновременном действии изгибающих моментов $M_y$ и $M_z$ в границах упругих деформаций стали | | п. 6.1.4 (6.6), (6.7) | п. 7.7.3 (7.76) |
| Прочность при одновременном действии изгибающих моментов $M_y$ и $M_z$ с учетом потери местной устойчивости | | п. 6.1.4 (6.4), (6.7) | п. 7.7.3 (7.76) |
| Прочность при действии поперечной силы $Q_z$ | п. 6.2.6 (6.17) | п. 6.1.5 (6.8) | п. 7.7.6 (7.79) |
| Прочность при действии поперечной силы $Q_y$ | п. 6.2.6 (6.17) | п. 6.1.5 (6.8) | п. 7.7.6 (7.79) |
| Прочность при одновременном действии изгибающего момента $M_y$ и поперечной силы $Q_z$ | п. 6.2.8 (6.29) | п. 6.1.10 (6.27) | п.7.3 (7.75), п. 7.7.5 (7.78) |
| Прочность при одновременном действии изгибающего момента My и поперечной силы $Q_z$ с учетом потери местной устойчивости | п. 6.2.8 (6.29) | п. 6.1.10 (6.27) | п. 7.7.3 (7.74), п. 7.7.5 (7.78) |
| Прочность при одновременном действии изгибающего момента $M_z$ и поперечной силы $Q_y$ | п. 6.2.8 (6.29) | п. 6.1.10 (6.27) | п. 7.7.3 (7.75), п. 7.7.5 (7.78) |
| Прочность при одновременном действии изгибающего момента $M_z$ и поперечной силы $Q_y$ с учетом потери местной устойчивости | п. 6.2.8 (6.29) | п. 6.1.10 (6.27) | п. 7.7.3 (7.74), п. 7.7.5 (7.78) |
| Прочность при совместном действии продольной силы N и изгибающих моментов $M_y$ и $M_z$ | | п. 6.1.8 (6.23), (6.24), п. 6.1.9 (6.25), (6.26) | п. 7.7.4 (7.77) |
| Прочность при совместном действии продольной силы N и изгибающих моментов $M_y$ и $M_z$ с учетом потери местной устойчивости | | п. 6.1.8 (6.23), (6.24), п. 6.1.9 (6.25), (6.26) | п. 7.7.4 (7.77) |
| Прочность при совместном действии продольной силы N, изгибающих моментов $M_y$, $M_z$ и поперечных сил $Q_z$, $Q_y$ | | п. 6.1.10 (6.27) | п. 7.7.4 (7.77), п. 7.7.5 (7.78) |
| Прочность при совместном действии продольной силы N, изгибающих моментов $M_y$, $M_z$ и поперечных сил $Q_z$, $Q_y$ с учетом потери местной устойчивости | | п. 6.1.10 (6.27) | п. 7.7.4 (7.77), п. 7.7.5 (7.78) |
| Интегральная прочность по нормальным напряжениям от от действия продольной силы N, изгибающих моментов $M_y$, $M_z$ и бимомента B | | п. 6.1.6 (6.11a) | п. 7.7.7 (7.82) |
| Интегральная прочность по нормальным напряжениям от действия продольной силы N, изгибающих моментов $M_y$, $M_z$ и бимомента B с учетом потери местной устойчивости | | п. 6.1.6 (6.11a) | п. 7.7.7 (7.82) |

| Фактор | Ссылка на EN 1993-1-1 | Ссылка на EN 1993-1-3 | Ссылка на СП 260.1325800 |
|---|---|---|---|
| Интегральная прочность по касательным напряжениям от действия поперечных сил $Q_z$, $Q_y$, момента свободного кручения T и момента стесненного кручения $M_w$ | | п. 6.1.6 (6.11b) | п. 7.7.7 (7.83) |
| Интегральная прочность по приведенным напряжениям от действия продольной силы N, изгибающих моментов $M_y$, $M_z$, поперечных сил $Q_z$, $Q_y$, момента свободного кручения T, бимомента B и момента стесненного кручения $M_w$ | | п. 6.1.6 (6.11c) | п. 7.7.7 (7.84) |
| Интегральная прочность по приведенным напряжениям от действия продольной силы N, изгибающих моментов $M_y$, $M_z$, поперечных сил $Q_z$, $Q_y$, момента свободного кручения T, бимомента B и момента стесненного кручения $M_w$ с учетом потери местной устойчивости | | п. 6.1.6 (6.11c) | п. 7.7.7 (7.84) |
| Устойчивость при действии продольной силы N (изгибное выпучивание относительно оси y-y) | п. 6.3.1 (6.46) – (6.51) | п. 6.2.2 | п. 7.7.8 (7.87), (7.88) |
| Устойчивость при действии продольной силы N с учетом потери местной устойчивости (изгибное выпучивание относительно оси y-y) | п. 6.3.1 (6.46) – (6.51) | п. 6.2.2 | п. 7.7.8 (7.87), (7.88) |
| Устойчивость при действии продольной силы N (изгибное выпучивание относительно оси z-z) | п. 6.3.1 (6.46) – (6.51) | п. 6.2.2 | п. 7.7.8 (7.87), (7.88) |
| Устойчивость при действии продольной силы N с учетом потери местной устойчивости (изгибное выпучивание относительно оси z-z) | п. 6.3.1 (6.46) – (6.51) | п. 6.2.2 | п. 7.7.8 (7.87), (7.88) |
| Устойчивость при действии продольной силы N (крутильное и изгибно-крутильное выпучивание) | п. 6.3.1 (6.46) – (6.49), (6.52), (6.53) | п. 6.2.3 | п. 7.7.8 (7.87), (7.89) – (7.92) |
| Устойчивость при действии продольной силы N с учетом потери местной устойчивости (крутильное и изгибно-крутильное выпучивание) | п. 6.3.1 (6.46) – (6.49), (6.52), (6.53) | п. 6.2.3 | п. 7.7.8 (7.87), (7.89) – (7.92) |
| Устойчивость плоской формы изгиба при действии изгибающего момента $M_y$ с учетом упруго-пластических деформаций стали | п. 6.3.2 (6.54) – (6.57) | п. 6.2.4 | не вычисляется |
| Устойчивость плоской формы изгиба при действии изгибающего момента $M_y$ | п. 6.3.2 (6.54) – (6.57) | п. 6.2.4 | п. 7.7.9 (7.93) – (7.98) |
| Устойчивость плоской формы изгиба при действии изгибающего момента $M_y$ с учетом потери местной устойчивости | п. 6.3.2 (6.54) – (6.57) | п. 6.2.4 | п. 7.7.9 (7.93) – (7.98) |
| Устойчивость плоской формы изгиба при действии изгибающего момента $M_z$ с учетом упруго-пластических деформаций стали | п. 6.3.2 (6.54) – (6.57) | п. 6.2.4 | не вычисляется |
| Устойчивость плоской формы изгиба при действии изгибающего момента $M_z$ | п. 6.3.2 (6.54) – (6.57) | п. 6.2.4 | п. 7.7.9 (7.93) – (7.98) |
| Устойчивость плоской формы изгиба при действии изгибающего момента $M_z$ с учетом потери местной устойчивости | п. 6.3.2 (6.54) – (6.57) | п. 6.2.4 | п. 7.7.9 (7.93) – (7.98) |
| Устойчивость при действии продольной силы N и изгибающих моментов $M_y$, $M_z$ | п. 6.3.3 (6.61) – (6.62) | п. 6.2.5(1) | п. 7.7.10 (7.99) – (7.100) |
| Устойчивость при действии продольной силы N и изгибающих моментов $M_y$, $M_z$ с учетом потери местной устойчивости | п. 6.3.3 (6.61) – (6.62) | п. 6.2.5(1) | п. 7.7.10 (7.99) – (7.100) |
| Устойчивость при действии продольной силы N и изгибающих моментов $M_y$, $M_z$ с учетом потери устойчивости плоской формы изгиба | п. 6.3.3 (6.61) – (6.62) | п. 6.2.5(1) | п. 7.7.10 (7.99) – (7.100) |
| Устойчивость при действии продольной силы N и изгибающих моментов $M_y$, $M_z$ с учетом потери устойчивости плоской формы изгиба и потери местной устойчивости | п. 6.3.3 (6.61) – (6.62) | п. 6.2.5(1) | п. 7.7.10 (7.99) – (7.100) |
| Прочность ветви при действии продольной силы растяжения N | п. 6.2.3 (6.5), п. 6.4.1 (6.69) | п. 6.1.2 (6.1) | п. 7.7.2.1 (7.68) |
| Прочность ветви при действии продольной силы сжатия N | п. 6.2.4 (6.9), п. 6.4.1 (6.69) | п. 6.1.3 (6.3) | п. 7.7.2.2 (7.68) |
| Прочность ветви при действии продольной силы N с учетом потери местной устойчивости | п. 6.2.4 (6.9), п. 6.4.1 (6.69) | п. 6.1.3 (6.2) | п. 7.7.2.1 (7.69) |
| Прочность ветви при действии изгибающего момента $M_y$ с учетом пластических деформаций стали | п. 6.2.5 (6.12), п. 6.4.1 (6.69) | п. 6.1.4 (6.5) | не вычисляется |
| Прочность ветви при действии изгибающего момента $M_y$ в границах упругих деформаций стали | п. 6.2.5 (6.12), п. 6.4.1 (6.69) | п. 6.1.4 (6.6) | п. 7.7.3 (7.75) |
| Прочность ветви при действии изгибающего момента $M_y$ с учетом потери местной устойчивости | п. 6.2.5 (6.12), п. 6.4.1 (6.69) | п. 6.1.4 (6.4) | п. 7.7.3 (7.74) |

| Фактор | Ссылка на EN 1993-1-1 | Ссылка на EN 1993-1-3 | Ссылка на СП 260.1325800 |
|---|---|---|---|
| Прочность ветви при действии поперечной силы $Q_z$ | п. 6.2.6 (6.17), п. 6.4.1 (6.69) | п. 6.1.5 (6.8) | п. 7.7.6 (7.79) |
| Прочность ветви при действии поперечной силы $Q_y$ | п. 6.2.6 (6.17), п. 6.4.1 (6.69) | п. 6.1.5 (6.8) | п. 7.7.6 (7.79) |
| Прочность ветви при одновременном действии изгибающего момента $M_y$ и поперечной силы $Q_z$ | п. 6.2.8 (6.29), п. 6.4.1 (6.69) | п. 6.1.10 (6.27) | п. 7.7.3 (7.75), 7.7.5 (7.78) |
| Прочность ветви при одновременном действии изгибающего момента $M_y$ и поперечной силы $Q_z$ с учетом потери местной устойчивости | п. 6.2.8 (6.29), п. 6.4.1 (6.69) | п. 6.1.10 (6.27) | п. 7.7.3 (7.74), п. 7.7.5 (7.78) |
| Прочность ветви при совместном действии продольной силы N и изгибающего момента $M_y$ | п. 6.4.1 (6.69) | п. 6.1.8 (6.23), (6.24), п. 6.1.9 (6.25), (6.26) | п. 7.7.4 (7.77) |
| Прочность ветви при совместном действии продольной силы N и изгибающего момента $M_y$ с учетом потери местной устойчивости | п. 6.4.1 (6.69) | п. 6.1.8 (6.23), (6.24), п. 6.1.9 (6.25), (6.26) | п. 7.7.4 (7.77) |
| Прочность ветви при совместном действии продольной силы N, изгибающего момента $M_y$ и поперечных сил $Q_z$, $Q_y$ | п. 6.4.1 (6.69) | п. 6.1.10 (6.27) | п. 7.7.4 (7.77), п. 7.7.5 (7.78) |
| Прочность ветви при совместном действии продольной силы N, изгибающего момента $M_y$ и поперечных сил $Q_z$, $Q_y$ с учетом потери местной устойчивости | п. 6.4.1 (6.69) | п. 6.1.10 (6.27) | п. 7.7.4 (7.77), п. 7.7.5 (7.78) |
| Интегральная прочность ветви по нормальным напряжениям от действия продольной силы N, изгибающих моментов $M_y$, $M_z$ и бимомента B | – | п. 6.1.6 (6.11a) | п. 7.7.7 (7.82) |
| Интегральная прочность ветви по нормальным напряжениям от действия продольной силы N, изгибающих моментов $M_y$, $M_z$ и бимомента B с учетом потери местной устойчивости | | п. 6.1.6 (6.11a) | п. 7.7.7 (7.82) |
| Интегральная прочность ветви по касательным напряжениям от действия поперечных сил $Q_z$, $Q_y$, момента свободного кручения T и момента стесненного кручения $M_w$ | | п. 6.1.6 (6.11b) | п. 7.7.7 (7.83) |
| Интегральная прочность ветви по приведенным напряжениям от действия продольной силы N, изгибающих моментов $M_y$, $M_z$, поперечных сил $Q_z$, $Q_y$, момента свободного кручения T, бимомента B и момента стесненного кручения $M_w$ | | п. 6.1.6 (6.11c) | п. 7.7.7 (7.84) |
| Интегральная прочность ветви по приведенным напряжениям от действия продольной силы N, изгибающих моментов $M_y$, $M_z$, поперечных сил $Q_z$, $Q_y$, момента свободного кручения T, бимомента B и момента стесненного кручения $M_w$ с учетом потери местной устойчивости | | п. 6.1.6 (6.11c) | п. 7.7.7 (7.84) |
| Устойчивость ветви при действии продольной силы N (изгибное выпучивание относительно оси y-y) | п. 6.3.1 (6.46) – (6.51), п. 6.4.1 (6.69) | п. 6.2.2 | п. 7.7.8 (7.87), (7.88) |
| Устойчивость ветви при действии продольной силы N с учетом потери местной устойчивости (изгибное выпучивание относительно оси y-y) | п. 6.3.1 (6.46) – (6.51), п. 6.4.1 (6.69) | п. 6.2.2 | п. 7.7.8 (7.87), (7.88) |
| Устойчивость ветви при действии продольной силы N (изгибное выпучивание относительно оси z-z) | п. 6.3.1 (6.46) – (6.51), п. 6.4.1 (6.69) | п. 6.2.2 | п. 7.7.8 (7.87), (7.88) |
| Устойчивость ветви при действии продольной силы N с учетом потери местной устойчивости (изгибное выпучивание относительно оси z-z) | п. 6.3.1 (6.46) – (6.51), п. 6.4.1 (6.69) | п. 6.2.2 | п. 7.7.8 (7.87), (7.88) |
| Устойчивость ветви при действии продольной силы N (крутильное и изгибно-крутильное выпучивание) | п. 6.3.1 (6.46) – (6.49), (6.52), (6.53), п. 6.4.1 (6.69) | п. 6.2.3 | п. 7.7.8 (7.87), (7.89) – (7.92) |
| Устойчивость ветви при действии продольной силы N с учетом потери местной устойчивости (крутильное и изгибно-крутильное выпучивание) | п. 6.3.1 (6.46) – (6.49), (6.52), (6.53), п. 6.4.1 (6.69) | п. 6.2.3 | п. 7.7.8 (7.87), (7.89) – (7.92) |
| Устойчивость ветки при действии изгибающего момента $M_y$ (потеря устойчивости плоской формы изгиба с учетом упруго-пластических деформаций стали) | п. 6.3.2 (6.54) – (6.57) | п. 6.2.4 | не вычисляется |
| Устойчивость ветви при действии изгибающего момента $M_y$ (потеря устойчивости плоской формы изгиба) | п. 6.3.2 (6.54) – (6.57), п. 6.4.1 (6.69) | п. 6.2.4 | п. 7.7.9 (7.93) – (7.98) |
| Устойчивость ветви при действии изгибающего момента $M_y$ с учетом потери местной устойчивости (потеря устойчивости плоской формы изгиба) | п. 6.3.2 (6.54) – (6.57), п. 6.4.1 (6.69) | п. 6.2.4 | п. 7.7.9 (7.93) – (7.98) |

| Фактор | Ссылка на EN 1993-1-1 | Ссылка на EN 1993-1-3 | Ссылка на СП 260.1325800 |
|---|---|---|---|
| Устойчивость ветви при действии продольной силы N и изгибающего момента $M_y$ | п. 6.3.3 (6.61) – (6.62), п. 6.4.1 (6.69) | п. 6.2.5(1) | п. 7.7.10 (7.99) – (7.100) |
| Устойчивость ветви при действии продольной силы N и изгибающего момента $M_y$ с учетом потери местной устойчивости | п. 6.3.3 (6.61) – (6.62), п. 6.4.1 (6.69) | п. 6.2.5(1) | п. 7.7.10 (7.99) – (7.100) |
| Устойчивость ветви при действии продольной силы N и изгибающего момента $M_y$ с учетом потери устойчивости плоской формы изгиба | п. 6.3.3 (6.61) – (6.62), п. 6.4.1 (6.69) | п. 6.2.5(1) | п. 7.7.10 (7.99) – (7.100) |
| Устойчивость ветви при действии продольной силы N и изгибающего момента $M_y$ с учетом потери устойчивости плоской формы изгиба и потери местной устойчивости | п. 6.3.3 (6.61) – (6.62), п. 6.4.1 (6.69) | п. 6.2.5(1) | п. 7.7.10 (7.99) – (7.100) |
| Несущая способность планки | п. 6.2.5 (6.12), п. 6.2.6 (6.17), п. 6.2.8 (6.29), п. 6.4.1 (6.70), п. 6.4.3.1 (6.73), (6.74) | – | п. 7.7.11.7 (7.106), п. 7.7.11.8 |
| Общая устойчивость сквозного стержня при действии продольной силы N (изгибное выпучивание относительно оси y-y) | – | – | п. 7.7.11.7 (7.87), (7.88), (7.102) – (7.105) |
| Общая устойчивость сквозного стержня при действии продольной силы N с учетом потери местной устойчивости (изгибное выпучивание относительно оси y-y) | – | – | п. 7.7.8 (7.87), (7.88), (7.102) – (7.105) |
| Общая устойчивость сквозного стержня при действии продольной силы N (изгибное выпучивание относительно оси z-z) | – | – | п. 7.7.8 (7.87), (7.88), (7.102) – (7.105) |
| Общая устойчивость сквозного стержня при действии продольной силы N с учетом потери местной устойчивости (изгибное выпучивание относительно оси z-z) | – | – | п. 7.7.8 (7.87), (7.88), (7.102) – (7.105) |
| Гибкость ветви | – | – | п. 7.7.11.5, п. 7.7.11.6 |

**Не предусмотрено выполнение проверок:**

- ослабленных сечений, в которых имеются отверстия для устройства болтового соединения;
- расчета болтового крепления планок к ветвям сквозного сечения из холодногнутых профилей;
- местного напряжения в стенке/стенках поперечного сечения от действия приложенной сосредоточенной силы или опорной реакции.



## Ограничения реализации

1. Нормы СП 260.1325800 для сжато-изогнутых элементов рекомендуют при определении относительного эксцентриситета принимать в качестве расчетного момент в сечении, которое расположено в определенной зоне стержня. Эта зона определяется в зависимости от варианта концевых закреплений стержня, о которых программа не имеет информации. Поэтому в запас надежности используется значение изгибающего момента, максимального по длине элемента.

2. Нормы не рассматривают задачу устойчивости растянуто-изогнутого стержня, но попросту не выполнять его проверку на устойчивость было бы неосторожно, поскольку при относительно небольшом растяжении потеря устойчивости все же может оказаться реальной (для упругого стержня это случилось бы тогда, когда в какой-нибудь фибре имеется сжатие, для упруго пластического стержня найти такую границу сложнее). Поскольку нормы не установили границу этого "относительно небольшого растяжения", в запас надежности проверка устойчивости растянуто-изогнутого стержня сведена к проверке устойчивости плоской формы изгиба.

3. При вычислении коэффициентов взаимодействия $k_{yy}$, $k_{yz}$ значение внутреннего изгибающего момента принимается равномерно

распределенным по длине стержня. Такой подход обеспечивает максимальный запас надежности.

4. Коэффициенты взаимодействия при проверке общей устойчивости стержневых элементов конструкций при действии продольного усилия сжатия и изгибающих моментов определяются согласно приложений А (метод 1) или В (метод 2) EN1993-1-1:2005. При вычислении коэффициента $k_{zy}$ нормы различают элементы чувствительные к деформациям кручения или же элементы не чувствительные к таким деформациям.

При вычисления коэффициента $k_{zy}$ решение о том, является ли элемент чувствительным к деформациям кручения или к потере устойчивости плоской формы изгиба или не является таковым, принимается программой автоматически на основании значений коэффициентов устойчивости $\chi_{LT}$ и $\chi_{TF}$, которые соответствуют потере устойчивости плоской формы изгиба и потере устойчивости при изгибно-крутильном выпучивании соответственно. В том случае, когда $\chi_{LT} < 1.0$ или $\chi_{TF} < 1.0$ считается, что элемент является чувствительным к деформациям кручения. При этом пользователю предоставлена возможность, активировав маркер **Закреплено от кручения**, напрямую указать, что элемент не является чувствительным к деформациям кручения (например, в случае когда элемент по всей своей длине раскреплен соответствующими связями).

## 20.7. Назначение групп унификации



Группы унификации для подбора сечений могут создаваться как в процессе назначения конструктивных элементов и их групп, так и после их создания. Формирование групп унификации выполняется в диалоговом окне **Группы унификации для подбора сечений** (рис. 20.7-1). В этом окне можно создать новую группу унификации, а также включить в ранее созданную группу конструктивные элементы и группы конструктивных элементов.

В процессе подбора сечений для всех элементов, входящих в группу унификации, будет подобрано одно и то же поперечное сечение.

Для создания новой группы унификации следует выполнить следующие действия:

- ввести имя группы в одноименном поле;
- нажать кнопку **Новая группа**, после чего имя новой группы попадает в список **Группы унификации**;
- в списке **Конструктивные элементы и группы конструктивных элементов** выбрать имена конструктивных элементов или групп, входящих в создаваемую группу унификации, и нажать кнопку ▶;
- для создания новой группы — повторить перечисленные операции;
- после завершения работы — выйти из диалогового окна нажатием кнопки **ОК**.

Если все объекты левого списка входят в одну унифицированную группу, то следует нажать кнопку ⏩. Для исключения элементов из группы унификации следует отметить их имена в правом списке и нажать кнопку ◀ или, используя кнопку ⏪, исключить из группы все объекты.

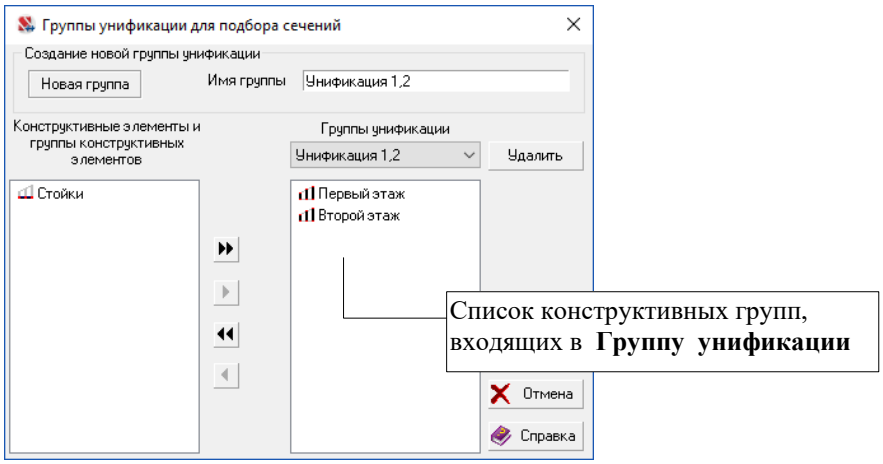



Рис. 20.7-1. *Диалоговое окно* **Группы унификации для подбора сечений**

Для корректировки ранее созданной группы унификации следует выбрать ее имя в списке групп диалогового окна **Группы унификации**, а затем, воспользовавшись кнопками  и  добавить в нее новые конструктивные группы или/и удалить существующие.

При создании групп унификации следует соблюдать следующие правила:

- в группу унификации могут входить только те объекты (конструктивные элементы и/или их группы), все стержни которых имеют одинаковый тип жесткости;
- объект может входить только в одну группу унификации.

## 20.8. Селекция элементов группы



Если в списке конструктивных групп инструментальной панели **Ввод данных** выбрана группа конструктивных элементов или конструктивный элемент, то нажатие этой кнопки приводит к тому, что все конечные элементы группы становятся селектированными. По умолчанию для селектированных узлов и элементов принят красный цвет. Смена цвета селекции выполняется в меню ***Настройки*** в разделе **Настройка цветовой схемы** (страница **Схема**, пункт **Выбор узлов и элементов**).

## 20.9. Режим визуализации активной группы



В тех случаях, когда не предполагается выполнение операций с выбранной конструктивной группой, а необходимо только выделить ее на схеме, используется операция визуализации конструктивной группы. Группа, выбранная в списке конструктивных групп инструментальной панели **Ввод данных**, будет «подсвечена» на схеме фиолетовым цветом.

## 20.10. Управление группами стальных конструктивных элементов и группами унификации



Операция  используется для управления атрибутами конструктивных групп и позволяет выполнить следующие действия:

- переименование группы;
- сортировка групп по заданному признаку;
- удаление группы;
- изменение места выбранной группы в списке групп.

Активация операции приводит к появлению одноименного диалогового окна (рис. 20.10-1), со списком конструктивных групп. Графы таблицы конструктивных групп включают:

- текущий номер конструктивной группы;
- **№** — номер группы в порядке создания;
- **Тип** — пиктограмма типа конструктивной группы (  — конструктивный элемент,  — группа конструктивных элементов). Если группа является дополнительной, то соответствующая икона имеет зеленый фон;
- **Имя** — имя конструктивной группы;
- **Количество элементов** в группе.

Для переименования группы следует установить курсор на имя нужной группы и дважды нажать левую кнопку мыши. Строка становится доступной для редактирования.

Характеристика группы, относительно которой выполняется сортировка, выбирается из списка **Сортировать по**. Предусмотрены следующие виды сортировок:

- по номеру (в очередности создания группы — при нажатой кнопке **Min/Max**; и наоборот — при нажатой кнопке **Max/Min**);
- по типу группы (при нажатой кнопке **Min/Max** первыми в списке будут конструктивные элементы, а затем группы конструктивных элементов и наоборот — при нажатой кнопке **Max/Min**);
- по имени группы (в алфавитном порядке при нажатой кнопке **Min/Max** и наоборот — при нажатой кнопке **Max/Min**);
- по количеству элементов в группе (по возрастанию количества элементов в списке конструктивных групп при нажатой кнопке **Min/Max** и наоборот — при нажатой кнопке **Max/Min**).

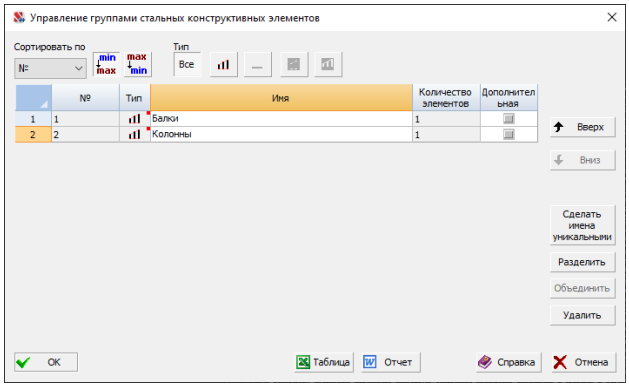



Рис. 20.10-1. *Диалоговое окно* **Управление группами стальных конструктивных элементов**

Для изменения положения в списке одной или нескольких конструктивных групп необходимо отметить эти группы и переместить их по списку на нужное количество позиций нажатием на кнопки **Вверх** и **Вниз**.

Для удаления конструктивных групп их следует выделить в таблице, для чего указать курсором на текущий номер группы и нажать левую кнопку мыши. После чего нажать кнопку **Удалить**. Если удаляемые группы идут в списке подряд, то для их выделения следует установить курсор на первую в списке группу, нажать левую кнопку мыши и, не отжимая кнопку, провести курсор по номерам удаляемых групп.

Если при вводе данных пользователь создал несколько групп с одинаковыми именами, то кнопка **Сделать имена уникальными** позволяет автоматически переименовать (добавляя к имени суффикс № XXX) группы и получить неповторяющиеся имена.

Для объединения групп конструктивных элементов следует выделить эти группы в списке при нажатой кнопке **Ctrl** на клавиатуре, после чего нажать кнопку **Объединить**. Операция будет доступна только в случае совпадения всех параметров объединяемых групп конструктивных элементов. После активации операции появится диалоговое окно, в котором вводится имя объединенной группы.

Кнопка **Разделить** предназначена для автоматизации процесса коррекции ошибок в данных о конструктивных элементах и автоматического создания конструктивных элементов и групп

конструктивных элементов. При нажатии этой кнопки для каждой выбранной группы производятся следующие действия.

- Из списка элементов удаляются все нестержневые элементы.
- Из списка элементов удаляются все элементы, которые не могут быть интерпретированы, как стальные.
- Для оставшихся элементов создаются конструктивные элементы путем объединения стержней с одинаковой жесткостью, лежащие на одной прямой и последовательно примыкающие друг к другу. Кроме того, контролируется отсутствие шарниров в промежуточных узлах. Допускается наличие жестких вставок при условии, что для всех элементов эти вставки одинаковы.
- Все прочие параметры (материал, расчетные длины, ...) наследуются из свойств первоначальной группы.
- Для всех оставшихся после описанных выше действий конечных элементов формируются группы конструктивных элементов. При этом в каждую такую группу попадают конечные элементы с одинаковыми типами жесткостей.

Кнопки, расположенные в верхней части диалогового окна позволяют отфильтровать группы, которые следует отображать (например, заказать отображение только дополнительных стальных конструктивных элементов).

Все назначения, сделанные в диалоговом окне, будут зафиксированы и выполнены после выхода из окна по кнопке **OK**. При этом положение конструктивных групп в списке инструментальной панели будут соответствовать их положению в списке диалогового окна.

Аналогичным образом операция  позволяет менять имена, удалять и изменять порядок следования групп унификации.

## 20.11.Смена сталей в группах конструктивных элементов




Эта операция используется для замены сталей (например, при смене норм проектирования) в нескольких конструктивных элементах или группах конструктивных элементов. Операция выполняется в диалоговом окне **Назначение сталей** (рис. 20.11-1), которое появляется после ее активации.

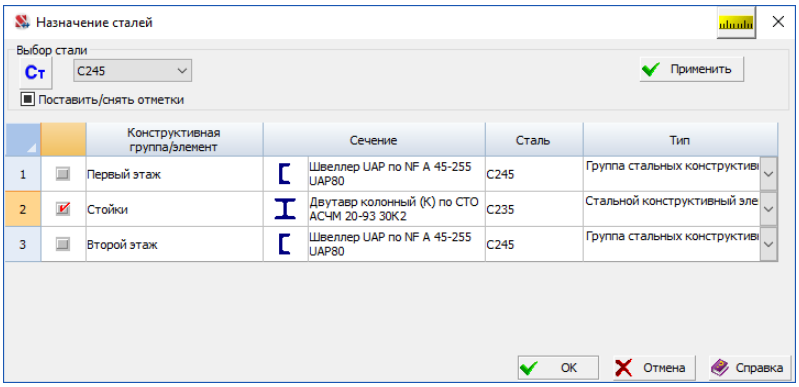



Рис. 20.11-1. *Диалоговое окно* **Назначение сталей**

Для изменения стали следует выполнить следующие действия:

- из списка сталей выбрать нужную или воспользоваться операцией выбора—  для назначения стали в соответствии с используемыми нормами проектирования;
- в списке конструктивных групп с помощью маркеров отметить группы, в которых будет использована выбранная сталь;
- нажать кнопку **Применить**, после чего в графе **Сталь** отмеченных групп появится наименование выбранной стали;

- повторить приведенные операции для назначения сталей другим конструктивным группам.

Кроме того, в колонке **Тип** указывается тип группы и можно заменить *Конструктивный элемент* на *Группу конструктивных элементов* и наоборот.

Если назначение выполняется для всех или большинства конструктивных групп, то для активации маркеров можно воспользоваться маркером **Поставить/снять отметки**. Все назначения, сделанные в диалоговом окне, будут зафиксированы и выполнены после выхода из окна по кнопке **OK**.

## 20.12. Информация о группах стальных конструктивных элементов

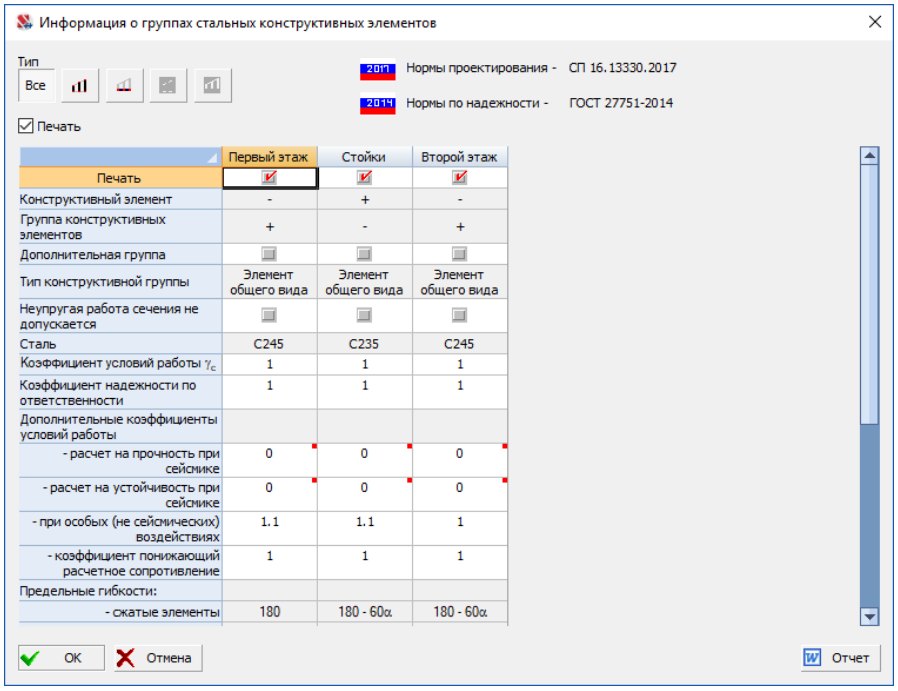



Рис. 20.12-1. *Диалоговое окно* **Информация о группах стальных конструктивных элементов**

Данная операция позволяет получить диалоговое окно (рис. 20.12-1) с данными во всех группах конструктивных элементов. Кнопка **Отчет** активирует создание отчетного элемента.

Кнопки, расположенные в верхней части диалогового окна, позволяют отфильтровать группы, которые следует отображать (например, заказать отображение только дополнительных стальных конструктивных элементов).

Маркеры в строке **Печать** позволяют отметить только те группы, информация о которых должна быть помещена в отчетный документ.

Кроме того, в данном окне некоторые данные можно изменять (коэффициенты расчетной длины, коэффициенты условий работы, ...). В случае ячеек с данными, которые могут быть изменены, в данном диалоге можно нажать правую кнопку мыши и в контекстном меню выбрать пункт **Применить для всех групп**. При этом данные, которые содержатся в активной ячейке, будут скопированы во все группы:




## 20.13. Визуализация измененных сечений



С помощью этой операции на расчетной схеме цветом выделяются конструктивные группы, у которых при их создании или корректировке была выполнена замена сечений (т. е. сечения конечных элементов, входящих в состав таких конструктивных элементов или групп, отличаются

от заданных в жесткостных характеристиках). В этом случае выводится цветовая шкала, аналогичная шкале цветового отображения жесткостей (рис. 20.13-1).

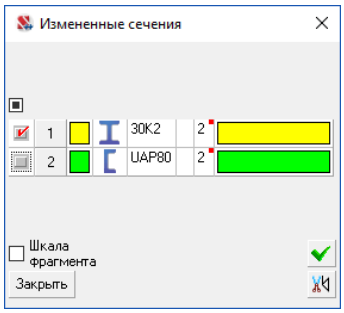



Рис. 20.13-1. *Диалоговое окно* **Измененные сечения**

## 20.14.Восстановление исходных сечений



Операция предназначена для восстановления исходных сечений (заданных в жесткостных характеристиках) в элементах конструктивных групп, у которых при их создании или корректировке была произведена замена сечения.

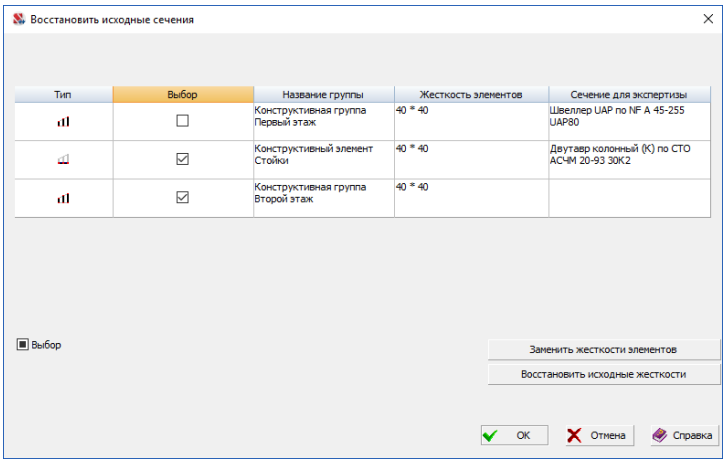



Рис. 20.14-1. *Диалоговое окно* **Восстановить исходные сечения**

При активации операции появляется диалоговое окно **Восстановить исходные сечения** (рис. 20.14-1), в котором следует отметить конструктивные группы, в которых выполняются изменения, выбрать вариант действий (восстановить исходные сечения или заменить жесткости элементов) и нажать кнопку **OK**. Вспомогательный маркер **Выбор** позволяет произвести селекцию или деселекцию всех групп. Если выбрана операция заменить жесткости элементов, то фактически замена произойдет после выхода из постпроцессора.

## 20.15.Смена норм проектирования




Операция позволяет изменить нормы проектирования стальных конструкций и нормы надежности. В диалоговом окне (рис. 20.15-1) из выпадающих списков следует выбрать нужные нормы и нажать кнопку **OK**. При смене норм следует помнить, что нормы, по которым выбирались расчетные сочетания усилий, и нормы проектирования должны корреспондироваться.

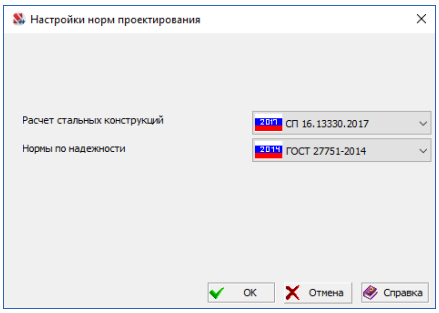



Рис. 20.15-1. *Диалоговое окно* **Настройки норм проектирования**

## 20.16.Экспертиза и подбор сечений



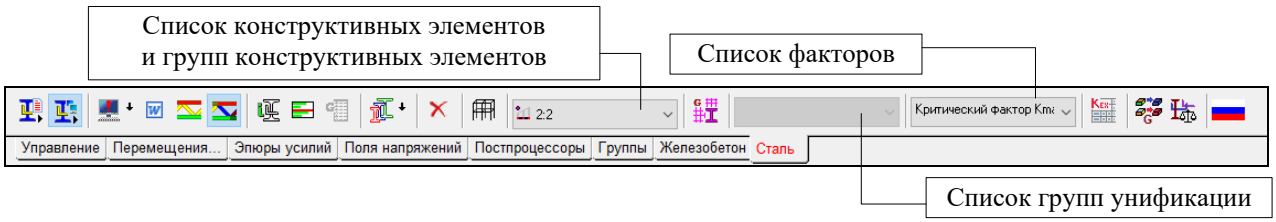



Рис. 20.16-1. *Инструментальная панель для расчета несущей способности стальных сечений и анализа результатов*

Инструментальная панель для экспертизы и анализа результатов (рис. 20.16-1) включает кнопки для вызова следующих операций:

 — активация расчета (экспертиза сечений);

 — формирование отчета;

 — визуализация результатов проверки на схеме (3-х цветная шкала);

 — визуализация результатов проверки на схеме (полноцветная цветная шкала);

 — информация о подобранных сечениях элементов;

 — визуализация результатов по выбранному конструктивному элементу или унифицированной группе;

 — состав группы конструктивных элементов;

 — подбор сечений;

 — сброс выбранной группы;

 — отображение расчетной схемы;

 — режим визуализации активной группы;

 — экстремальные значения факторов;

 — элементы технической спецификации стали;

 — информация о расходе стали;

 — индикация норм проектирования.

Экспертиза несущей способности конструктивных элементов и/или групп конструктивных элементов выполняется нажатием кнопки **Расчет** —  . Данная кнопка содержит стрелку дополнительных возможностей, которая позволяет, кроме полного подбора или экспертизы для всех конструктивных групп, выполнить расчет только для тех групп, в которые вносились изменения, произвести расчет только выбранных пользователем групп (в этом случае появится диалоговое окно со списком групп и пользователь должен произвести выбор[1]), активировать операции контроля данных (без проведения расчета), просмотр сообщений, которые выводились при предыдущем расчете или контроле, и удаление результатов. Независимо от того, вносились ли изменения во все конструктивные группы или только в часть из них, контроль исходных данных выполняется для всех групп и, соответственно, диагностические сообщения будут выданы для всех групп, а не только для тех, которые пересчитывались.

Проверка выполняется для всех сечений конечных элементов, входящих в конструктивный элемент или группу конструктивных элементов. Результатом экспертизы является наибольшее значение каждого фактора, определяющего несущую способность элемента.

В программе реализован весь комплекс проверок по прочности и устойчивости в соответствии с рекомендациями различных норм. Поскольку ограничения реализации одинаковы по смыслу, но относятся к различным пунктам нормативных документов разных лет, то в качестве примера они будут приведены в виде ссылок на разделы СНиП II-23-81*, ШНК 2.03.05-13:

- растянутые стержни не проверяются на прочность по формуле (6) как элементы, эксплуатация которых возможна после достижения предела текучести;
- при определении коэффициента $\varphi_б$ в запас надежности принято, что нагрузка имеет вид равномерно распределенной и приложена к сжатому поясу, который не закреплен в пролете от потери устойчивости.

Подход к определению коэффициента $\varphi_б$ основан на следующих соображениях:

- СНиП не предусматривает всех мыслимых сочетаний раскрепления сжатого пояса и распределения нагрузки по пролету, поэтому любое решение не будет полным;
- в реальных ситуациях практически не встречаются конструкции, работающие только на одно загружение (в составе загружений могут быть и распределенные нагрузки). Следует учитывать, что выполняемый расчет условен, поскольку используются расчетные сочетания усилий, и огибающая эпюра моментов не может быть точно идентифицирована, как происходящая от определенной нагрузки, приложенной к определенному поясу.

Подход реализует концепцию СНиП, где, например, разрешено находить свободные длины для одного («самого сжатого») загружения и использовать эти длины при проверках по другим нагружениям, определяя, в частности, по этим длинам коэффициенты продольного изгиба $\varphi$ (см. п. 6.11* СНиП II-23-81*). Коэффициент $\varphi_б$ используется для тех же целей, что и коэффициент продольного изгиба $\varphi$.

Однако, используя кнопку  можно активировать специальный диалог, в котором пользователь может выбрать одно из предусмотренных нормами правило вычисления данного коэффициента (при этом ответственность за последствия такого выбора несет пользователь) или с помощью кнопки **По умолчанию** вернуться к стандартному (описанному выше) поведению программы.

Набор проверок по СНиП II-23-81*, ШНК 2.03.05-13 определяется типом поперечного сечения элемента и комплектом действующих на него нагрузок. В таблицах ниже приведены списки проверок для различных типов конструктивных элементов.

[1] В случае подбора сечений, при выборе группы входящей в группу унификации, автоматически будут выбраны все группы, входящие в соответствующую группу унификации.

**Проверки стоек и элементов общего вида**

| Проверка | Ссылка на СНиП II-23-81* | Ссылка на СНиП РК 5.04-23-2002 | Ссылка на СП 53-102-2004 | Ссылка на СП 16.13330 | Ссылка на ДБН В.2.6-163:2010 | Ссылка на ДБН В.2.6-198:2014 | Ссылка на ШНК 2.03.05-13 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Прочность при центральном сжатии/растяжении | п. 5.1 | п. 5.1 | п. 8.1.1 | п. 7.1.1 | п. 1.4.1.3 | п. 8.1.3 | п. 7.1 |
| Чрезмерные деформации растянутого волокна | п. 5.28 | п. 5.28 | п. 10.1.3 | п. 9.1.3 | п. 1.6.1.3 | п. 10.1.3 | п. 7.28 |
| Прочность при действии изгибающего момента $M_y$ | п. 5.12 | п. 5.12 | п. 9.2.1 | п. 8.2.1 | п. 1.5.2.1 | п. 9.2.1 | п. 7.12 |
| Прочность при действии изгибающего момента $M_z$ | п. 5.12 | п. 5.12 | п. 9.2.1 | п. 8.2.1 | п. 1.5.2.1 | п. 9.2.1 | п. 7.12 |
| Прочность при действии поперечной силы $Q_y$ | пп. 5.12, 5.18* | пп. 5.12, 5.18 | пп. 9.2.1, 10.1.1 | п. 8.2.1 | п. 1.5.2.1 | п. 9.2.1 | пп. 7.12, 7.18 |
| Прочность при действии поперечной силы $Q_z$ | пп. 5.12, 5.18* | пп. 5.12, 5.18 | пп. 9.2.1, 10.1.1 | п. 8.2.1 | п. 1.5.2.1 | п. 9.2.1 | пп. 7.12, 7.18 |
| Прочность при совместном действии продольной силы и изгибающих моментов | пп. 5.24, 5.25 | пп. 5.24, 5.25 | п. 10.1.1 | п. 9.1.1 | п. 1.6.1.1 | п. 10.1.1 | пп. 7.24, 7.25 |
| Прочность при совместном действии продольной силы и изгибающих моментов с учетом пластики | пп. 5.24, 5.25 | пп. 5.24, 5.25 | п. 10.1.1 | п. 9.1.1 | п. 1.6.1.1 | п. 10.1.1 | пп. 7.24, 7.25 |
| Прочность при совместном действии продольной силы и изгибающих моментов без учета пластики | пп. 5.24, 5.25 | пп. 5.24, 5.25 | п. 10.1.1 | п. 9.1.1 | п. 1.6.1.1 | п. 10.1.1 | пп. 7.24, 7.25 |
| Прочность по приведенным напряжениям при одновременном действии изгибающего момента и поперечной силы | п. 5.14* | п. 5.14 | п. 9.2.1 | п. 8.2.1 | п. 1.5.2.1 | п. 9.2.1 | п. 7.14 |

| Проверка | Ссылка на СНиП II-23-81* | Ссылка на СНиП РК 5.04-23-2002 | Ссылка на СП 53-102-2004 | Ссылка на СП 16.13330 | Ссылка на ДБН В.2.6-163:2010 | Ссылка на ДБН В.2.6-198:2014 | Ссылка на ШНК 2.03.05-13 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Устойчивость при сжатии в плоскости XoY (XoU) | п. 5.3 | п. 5.3 | п. 8.1.3 | п. 7.1.3 | п. 1.4.1.3 | п. 8.1.3 | п. 7.3 |
| Устойчивость при сжатии в плоскости XoY (закритическая работа) | п. 5.3, 7.20* | пп. 5.3, 7.30 | п. 8.1.3, 8.3.5 | п. 7.1.3, 7.3.6 | п. 1.4.1.3, 1.4.3.5 | п. 8.1.3, 8.3.5 | п. 7.3, 9.20 |
| Устойчивость при сжатии в плоскости XoZ (XoV) ) | п. 5.3 | п. 5.3 | п. 8.1.3 | п. 7.1.3 | п. 1.4.1.3 | п. 8.1.3 | п. 7.3 |
| Устойчивость при сжатии в плоскости XoZ (XoV) ) (закритическая работа) | п. 5.3, 7.20* | п. 5.3, 7.30 | п. 8.1.3, 8.3.5 | п. 7.1.3, 7.3.6 | п. 1.4.1.3, 1.4.3.5 | п. 8.1.3, 8.3.5 | п. 7.3, 9.20 |
| Устойчивость при сжатии уголка | п. 5.3 | п. 5.3 | п. 8.1.3 | п. 7.1.3 | п. 1.4.1.3 | п. 8.1.3 | п. 7.3 |
| Устойчивость в плоскости действия момента $M_y$ при внецентренном сжатии | п. 5.27* | п. 5.27 | пп. 10.2.9, 10.2.10 | пп. 9.2.9, 9.2.10 | пп. 1.6.2.9, 1.6.2.10 | пп. 10.2.9, 10.2.10 | п. 7.27 |
| Устойчивость в плоскости действия момента $M_y$ при внецентренном сжатии (закритическая работа) | п. 5.27, 7.20* | пп. 5.27, 7.30 | пп. 10.2.9, 10.2.10, 10.4.6 | пп. 9.2.2, 9.2.10, 9.4.6 | пп. 1.6.2.2, 1.6.2.10, 1.6.4.5 | пп. 10.2.2, 10.2.10, 10.4.5 | п. 7.27, 9.20 |
| Устойчивость в плоскости действия момента $M_z$ при внецентренном сжатии | п. 5.27* | п. 5.27 | пп. 10.2.9, 10.2.10, 10.3.1, 10.3.2 | пп. 9.2.9, 9.2.10, 9.3.1, 9.3.2 | пп. 1.6.2.9, 1.6.2.10, 1.6.3.1, 1.6.3.2 | пп. 10.2.9, 10.2.10, 10.3.1, 10.3.2 | п. 7.27 |
| Устойчивость в плоскости действия момента $M_z$ при внецентренном сжатии (закритическая работа) | п. 5.27, 7.20* | пп. 5.27, 7.30 | пп. 10.2.9, 10.2.10, 10.3.1, 10.3.2, 10.4.6 | пп. 9.2.8, 9.2.10, 9.3.1, 9.3.2, 9.4.6 | пп. 1.6.2.8, 1.6.2.10, 1.6.3.1, 1.6.3.2, 1.6.4.5 | пп. 10.2.8, 10.2.10, 10.3.1, 10.3.2, 10.4.5 | п. 7.27, 9.20 |
| Устойчивость при сжатии с изгибом в двух плоскостях | п. 5.34 | п. 5.35 | п. 10.2.9 | п. 9.2.9 | п. 1.6.2.9 | п. 10.2.9 | п. 7.34 |

| Проверка | Ссылка на СНиП II-23-81* | Ссылка на СНиП РК 5.04-23-2002 | Ссылка на СП 53-102-2004 | Ссылка на СП 16.13330 | Ссылка на ДБН В.2.6-163:2010 | Ссылка на ДБН В.2.6-198:2014 | Ссылка на ШНК 2.03.05-13 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Устойчивость при сжатии с изгибом в двух плоскостях (закритическая работа) | п. 5.34, 7.20* | пп. 5.35, 7.30 | п. 10.2.9, 10.4.6 | пп. 9.2.9, 9.2.10, 9.4.6 | пп. 1.6.2.9, 1.6.2.10, 1.6.4.5 | пп. 10.2.9, 10.2.10, 10.4.5 | п. 7.34, 9.20 |
| Устойчивость из плоскости действия момента $M_y$ при внецентренном сжатии | пп. 5.30-5.32 | пп. 5.30-5.32 | пп. 10.2.4, 10.2.5, 10.2.8 | пп. 9.2.4, 9.2.5, 9.2.8 | пп. 1.6.2.4, 1.6.2.5, 1.6.2.8 | пп. 10.2.4, 10.2.5, 10.2.8 | пп. 7.30-7.32 |
| Устойчивость из плоскости действия момента $M_y$ при внецентренном сжатии (закритическая работа) | пп. 5.30-5.32, 7.20* | пп. 5.30-5.32, 7.30 | пп. 10.2.4, 10.2.5, 10.2.8, 10.4.6 | пп. 9.2.4, 9.2.5, 9.2.8, 9.2.10, 9.4.6 | пп. 1.6.2.4, 1.6.2.5, 1.6.2.8, 1.6.4.5 | пп. 10.2.4, 10.2.5, 10.2.8, 10.4.5 | пп. 7.30-7.32, 9.20 |
| Устойчивость из плоскости действия момента $M_z$ при внецентренном сжатии (сечения типа  ,  ,  ,  ,  ,  ,  не проверяются) | пп. 5.27*, 5.30-5.32 | пп. 5.27, 5.30-5.32 | пп. 10.2.4, 10.2.5, 10.2.8, 10.3.1, 10.3.2 | пп. 9.2.4, 9.2.5, 9.2.8, 9.3.1, 9.3.2 | пп. 1.6.2.4, 1.6.2.5, 1.6.2.8, 1.6.3.1, 1.6.3.2 | пп. 10.2.4, 10.2.5, 10.2.8, 10.3.1, 10.3.2 | пп. 7.27, 7.30-7.32 |
| Устойчивость из плоскости действия момента $M_z$ при внецентренном сжатии (закритическая работа) | пп. 5.27*, 5.30-5.32, 7.20* | пп. 5.27, 5.30-5.32, 7.30 | пп. 10.2.4,10.2.5,10.2.8, 10.3.1, 10.3.2, 10.4.6 | пп. 9.2.4, 9.2.5, 9.2.8, 9.2.10, 9.3.1, 9.3.2, 9.4.6 | пп. 1.6.2.4, 1.6.2.5, 1.6.2.8, 1.6.3.1, 1.6.3.2, 1.6.4.5 | пп. 10.2.4, 10.2.5, 10.2.8, 10.3.1, 10.3.2, 10.4.5 | пп. 7.27, 7.30-7.32, 9.20 |

| Проверка | Ссылка на СНиП II-23-81* | Ссылка на СНиП РК 5.04-23-2002 | Ссылка на СП 53-102-2004 | Ссылка на СП 16.13330 | Ссылка на ДБН В.2.6-163:2010 | Ссылка на ДБН В.2.6-198:2014 | Ссылка на ШНК 2.03.05-13 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Устойчивость плоской формы изгиба (сечения типа  ,  ,  ,  ,  ,  ,  ,  не проверяются) | п. 5.15 | п. 5.15 | п. 9.4.1 | п. 8.4.1 | п. 1.5.4.1 | п. 9.4.1 | п. 7.15 |
| Устойчивость плоской формы изгиба с учетом пластики | | | п. 9.4.6 | п. 8.4.6 | п. 1.5.4.6 | п. 9.4.6 | |
| Гибкость стенки из условия местной устойчивости | пп. 7.1. 7.2*, 7.3, 7.4*–7.6*, 7.9, 7.10; пп. 7.14, 7.16*, 7.17*, 7.18*, табл. 27* | пп. 7.1. 7.2, 7.3, 7.4–7.6, 7.9, 7.10; 7.23, 7.26, 7.27, 7.28, | п. 8.3.2, табл. 8; п. 8.3.10; п. 9.5.1–9.5.9; п. 10.4.2, табл. 20; п. 10.4.3; п. 10.4.9 | п. 7.3.2, табл. 9; п. 7.3.11; п. 8.5.1–8.5.9; п. 9.4.2, табл. 22; п. 9.4.3; п. 9.4.9 | п. 1.4.3.2, табл. 1.4.3; п. 1.5.5.1–1.5.5.9; п. 1.6.4.2, табл. 1.6.3; п. 1.6.4.5 | п. 8.3.2, табл. 8.3; п. 9.5.1–9.5.9; п. 10.4.2, табл. 10.3; п. 10.4.5 | пп. 9.1 – 9.7, 9.10, 9.11; пп. 9.15, 9.16, 9.17, 9.18 |
| Гибкость свеса полки (поясного листа) из условия местной устойчивости | п. 7.22*, 7.23*, табл. 29*, п. 7.24, табл. 30; п. 7.27* | п. 7.32, 7.33, 7.34, 7.37 | п. 8.3.7, табл. 9; п. 8.3.10; п. 9.5.14; п. 10.4.7, табл. 21; п. 10.4.9 | п. 7.3.8, табл. 10; п. 7.3.11; п. 8.5.18; п. 9.4.7, табл. 23; п. 9.4.9 | п. 1.4.3.7, табл. 1.4.4; п. 1.5.5.14; п. 1.6.4.8, табл. 1.6.4; п. 1.6.4.7 | п. 8.3.7, табл. 8.4; п. 9.5.14; п. 10.4.8, табл. 10.4; п. 10.4.7 | пп. 9.22, 9.23, пп. 9.24, 9.27 |
| Тонкостенность трубы из условия местной устойчивости | п. 8.6 | п. 8.6 | п. 12.2.2 | п. 11.2.2 | п. 1.10.2.2 | п. 14.2.2 | п. 10.6 |
| Местная устойчивость стенки трубы из расчета замкнутой круговой цилиндрической оболочки | пп. 8.5-8.13 | пп. 8.5-8.13 | пп. 12.2.1-12.2.8 | пп. 11.2.1-11.2.9 | пп. 1.10.2.1-1.10.2.9 | пп. 14.2.1-14.2.9 | пп. 10.5-10.13 |
| Соотношение высоты стенки балки к ее толщине | п. 7.4* | п. 7.4 | п. 9.5.3 | п. 8.5.3 | п. 1.5.5.3 | п. 9.5.3 | п. 9.5 |
| Общая устойчивость сквозного стержня при центральном сжатии в плоскости XoY | пп. 5.3-5.6 | пп. 5.3-5.6 | пп. 8.1.3-8.1.5, 8.2.2 | пп. 7.1.3-7.1.5, 7.2.2 | пп. 1.4.1.3, 1.4.1.5, 1.4.2.2, 1.4.2.5 | пп. 8.1.3, 8.1.5, 8.2.2, 8.2.5 | пп. 7.3-7.6 |

| Проверка | Ссылка на СНиП II-23-81* | Ссылка на СНиП РК 5.04-23-2002 | Ссылка на СП 53-102-2004 | Ссылка на СП 16.13330 | Ссылка на ДБН В.2.6-163:2010 | Ссылка на ДБН В.2.6-198:2014 | Ссылка на ШНК 2.03.05-13 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Общая устойчивость сквозного стержня при центральном сжатии в плоскости XoZ | пп. 5.3-5.6 | пп. 5.3-5.6 | пп. 8.1.3-8.1.5, 8.2.2 | пп. 7.1.3-7.1.5, 7.2.2 | пп. 1.4.1.3, 1.4.1.5, 1.4.2.2, 1.4.2.5 | пп. 8.1.3, 8.1.5, 8.2.2, 8.2.5 | пп. 7.3-7.6 |
| Устойчивость из плоскости действия момента $M_z$ | пп. 5.27*, 5.30-5.32 | пп. 5.27, 5.30-5.32 | пп. 10.2.4,10.2.5, 10.2.8, 10.3.1, 10.3.2 | пп. 9.2.4, 9.2.5, 9.2.8, 9.3.1, 9.3.2 | пп. 1.6.2.4, 1.6.2.5, 1.6.2.8, 1.6.3.1, 1.6.3.2 | пп. 10.2.4, 10.2.5, 10.2.8, 10.3.1, 10.3.2 | пп. 7.27, 7.30-7.32 |
| Сопротивление соединительной планки изгибу | пп. 5.8, 5.9, 5.36 | пп. 5.8, 5.9, 5.38 | пп. 8.2.7, 8.2.8, 10.3.7 | пп. 7.2.7, 7.2.8, 9.3.7 | пп. 1.4.2.7, 1.4.2.8, 1.6.3.7 | пп. 8.2.7, 8.2.8, 10.3.7 | пп. 7.8, 7.9, 7.36 |
| Прочность ветви при действии изгибающего момента $M_y$ | п. 5.12 | п. 5.12 | п. 9.2.1 | п. 8.2.1 | п. 1.5.2.1 | п. 9.2.1 | п. 7.12 |
| Прочность ветви при действии изгибающего момента $M_z$ | п. 5.12 | п. 5.12 | п. 9.2.1 | п. 8.2.1 | п. 1.5.2.1 | п. 9.2.1 | п. 7.12 |
| Прочность ветви при действии поперечной силы $Q_y$ | пп. 5.12, 5.18* | пп. 5.12, 5.18 | пп. 9.2.1, 9.2.3 | пп. 8.2.1, 8.2.3 | пп. 1.5.2.1, 1.5.2.3 | пп. 9.2.1, 9.2.3 | пп. 7.12, 7.18 |
| Прочность ветви при действии поперечной силы $Q_z$ | пп. 5.12, 5.18* | пп. 5.12, 5.18 | пп. 9.2.1, 9.2.3 | пп. 8.2.1, 8.2.3 | пп. 1.5.2.1, 1.5.2.3 | пп. 9.2.1, 9.2.3 | пп. 7.12, 7.18 |
| Прочность ветви при совместном действии продольной силы и изгибающих моментов | пп. 5.24, 5.25, 5.33 | пп. 5.24, 5.25, 5.33 | пп. 10.1.1, 10.3.3 | пп. 9.1.1, 9.3.3 | пп. 1.6.1.1, 1.6.3.3 | пп. 10.1.1, 10.3.3 | пп. 7.24, 7.25, 7.33 |
| Прочность ветви при совместном действии продольной силы и изгибающих моментов с учетом пластики | пп. 5.24, 5.25, 5.33 | пп. 5.24, 5.25, 5.33 | пп. 10.1.1, 10.3.3 | пп. 9.1.1, 9.3.3 | пп. 1.6.1.1, 1.6.3.3 | пп. 10.1.1, 10.3.3 | пп. 7.24, 7.25, 7.33 |

| Проверка | Ссылка на СНиП II-23-81* | Ссылка на СНиП РК 5.04-23-2002 | Ссылка на СП 53-102-2004 | Ссылка на СП 16.13330 | Ссылка на ДБН В.2.6-163:2010 | Ссылка на ДБН В.2.6-198:2014 | Ссылка на ШНК 2.03.05-13 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Прочность ветви при совместном действии продольной силы и изгибающих моментов без учета пластики | пп. 5.24, 5.25, 5.33 | пп. 5.24, 5.25, 5.33 | пп. 10.1.1, 10.3.3 | п. 9.1.1, 9.3.3 | пп. 1.6.1.1, 1.6.3.3 | пп. 10.1.1, 10.3.3 | пп. 7.24, 7.25, 7.33 |
| Устойчивость ветви при сжатии в плоскости XoY | пп. 5.3, 5.6 | пп. 5.3, 5.6 | пп. 8.1.3, 8.2.3-8.2.5 | пп. 7.1.3, 7.2.3-7.2.5 | пп. 1.4.1.3, 1.4.2.3, 1.4.2.4 | пп. 8.1.3, 8.2.3, 8.2.4 | пп. 7.3, 7.6 |
| Устойчивость ветви при сжатии в плоскости XoY (закритическая работа) | пп. 5.3, 5.6, 7.20* | пп. 5.3, 5.6, 7.30 | пп. 8.1.3, 8.2.3-8.2.5, 8.3.5 | пп. 7.1.3, 7.2.3-7.2.5, 7.3.6 | пп. 1.4.1.3, 1.4.2.3, 1.4.2.4, 1.4.3.5 | пп. 8.1.3, 8.2.3, 8.2.4, 8.3.5 | пп. 7.3, 7.6, 9.20 |
| Устойчивость ветви при сжатии в плоскости XoZ | пп. 5.3, 5.6 | пп. 5.3, 5.6 | пп. 8.1.3, 8.2.3-8.2.5 | пп. 7.1.3, 7.2.3-7.2.5 | пп. 1.4.1.3, 1.4.2.3, 1.4.2.4 | пп. 8.1.3, 8.2.3, 8.2.4 | пп. 7.3, 7.6 |
| Устойчивость ветви при сжатии в плоскости XoZ (закритическая работа) | пп. 5.3, 5.6, 7.20* | пп. 5.3, 5.6, 7.30 | пп. 8.1.3, 8.2.3-8.2.5, 8.3.5 | пп. 7.1.3, 7.3.6, 7.2.3-7.2.5 | пп. 1.4.1.3, 1.4.2.3, 1.4.2.4, 1.4.3.5 | пп. 8.1.3, 8.2.3, 8.2.4, 8.3.5 | пп. 7.3, 7.6, 9.20 |
| Устойчивость ветви в плоскости действия момента $M_y$ при внецентренном сжатии | пп. 5.27*, 5.33, 5.35 | пп. 5.27, 5.33, 5.37 | пп. 10.2.9, 10.3.3, 10.3.4, 10.3.6 | пп. 9.2.9, 9.3.3, 9.3.4, 9.3.6 | пп. 1.6.2.9, 1.6.3.3-1.6.3.5 | пп. 10.2.9, 10.3.3-10.3.5 | пп. 7.27, 7.33, 7.35 |
| Устойчивость ветви в плоскости действия момента $M_y$ при внецентренном сжатии (закритическая работа) | пп. 5.27*, 5.33, 5.35, 7.20* | пп. 5.27, 5.33, 5.37, 7.30 | пп. 10.2.9, 10.2.10, 10.3.3, 10.3.4, 10.3.6, 10.4.6 | пп. 9.2.2, 9.2.10, 9.3.3, 9.3.4, 9.3.6, 9.4.6 | пп. 1.6.2.2, 1.6.2.10, 1.6.3.3-1.6.3.5, 1.6.4.5 | пп. 10.2.2, 10.2.10, 10.3.3-10.3.5, 10.4.5 | пп. 7.27, 7.33, 7.35, 9.20 |
| Устойчивость ветви в плоскости действия момента $M_z$ при внецентренном сжатии | пп. 5.27*, 5.33, 5.35 | пп. 5.27, 5.33, 5.37 | пп. 10.2.9, 10.3.3, 10.3.4, 10.3.6 | пп. 9.2.9, 9.3.1, 9.3.3, 9.3.4, 9.3.6 | пп. 1.6.2.9, 1.6.3.3-1.6.3.5 | пп. 10.2.9, 10.3.3-10.3.5 | пп. 7.27, 7.33, 7.35 |

| Проверка | Ссылка на СНиП II-23-81* | Ссылка на СНиП РК 5.04-23-2002 | Ссылка на СП 53-102-2004 | Ссылка на СП 16.13330 | Ссылка на ДБН В.2.6-163:2010 | Ссылка на ДБН В.2.6-198:2014 | Ссылка на ШНК 2.03.05-13 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Устойчивость ветви в плоскости действия момента $M_z$ при внецентренном сжатии (закритическая работа) | пп. 5.27*, 5.33, 5.35, 7.20* | пп. 5.27, 5.33, 5.37, 7.30 | пп. 10.2.9, 10.2.10, 10.3.2-10.3.4, 10.3.6, 10.4.6 | пп. 9.2.8, 9.2.10, 9.3.2, 9.4.6, 9.3.1, 9.3.3, 9.3.4, 9.3.6 | пп. 1.6.2.8, 1.6.2.10, 1.6.3.2-1.6.3.5, 1.6.4.5 | пп. 10.2.8, 10.2.10, 10.3.2-10.3.5, 10.4.5 | пп. 7.27, 7.33, 7.35, 9.20 |
| Изгиб ветви в двух главных плоскостях | пп. 5.24, 5.25 | пп. 5.24, 5.25 | п. 10.1.1 | п. 9.1.1 | п. 1.6.1.1 | п. 10.1.1 | пп. 7.24, 7.25 |
| Устойчивость ветви из плоскости действия момента $M_y$ при внецентренном сжатии | пп. 5.27*, 5.30-5.33, 5.35 | пп. 5.27, 5.30-5.33, 5.37 | пп. 10.2.4, 10.2.5, 10.2.8, 10.3.3, 10.3.4, 10.3.6 | пп. 9.2.4, 9.2.5, 9.2.8, 9.3.1, 9.3.3, 9.3.4, 9.3.6 | пп. 1.6.2.4, 1.6.2.5, 1.6.2.8, 1.6.3.3-1.6.3.5 | пп. 10.2.4, 10.2.5, 10.2.8, 10.3.3-10.3.5 | пп. 7.27, 7.30-7.33, 7.35 |
| Устойчивость ветви из плоскости действия момента $M_y$ при внецентренном сжатии (закритическая работа) | пп. 5.27*, 5.30-5.33, 5.35, 7.20* | пп. 5.27, 5.30-5.33, 5.37, 7.30 | пп. 10.2.4, 10.2.5, 10.2.8, 10.3.3, 10.3.4, 10.3.6, 10.4.6 | пп. 9.2.4, 9.2.5, 9.2.8, 9.2.10, 9.4.6, 9.3.1, 9.3.3, 9.3.4, 9.3.6 | пп. 1.6.2.4, 1.6.2.5, 1.6.2.8, 1.6.3.3, 1.6.3.4, 1.6.3.5, 1.6.4.5 | пп. 10.2.4, 10.2.5, 10.2.8, 10.3.3, 10.3.4, 10.3.5, 10.4.5 | пп. 7.27, 7.30-7.33, 7.35, 9.20 |
| Устойчивость ветви из плоскости действия момента $M_z$ при внецентренном сжатии | пп. 5.27*, 5.30-5.33, 5.35 | пп. 5.27, 5.30-5.33, 5.37 | пп. 10.2.4, 10.2.5, 10.2.8, 10.3.3, 10.3.4, 10.3.6 | пп. 9.2.4, 9.2.5, 9.2.8, 9.3.1, 9.3.3, 9.3.4, 9.3.6 | пп. 1.6.2.4, 1.6.2.5, 1.6.2.8, 1.6.3.3-1.6.3.5 | пп. 10.2.4, 10.2.5, 10.2.8, 10.3.3-10.3.5 | пп. 7.27, 7.30-7.33, 7.35 |
| Устойчивость ветви из плоскости действия момента $M_z$ при внецентренном сжатии (закритическая работа) | пп. 5.27*, 5.30-5.33, 5.35, 7.20* | пп. 5.27, 5.30-5.33, 5.37, 7.30 | пп. 10.2.4, 10.2.5, 10.2.8, 10.3.3, 10.3.4, 10.3.6, 10.4.6 | пп. 9.2.4, 9.2.5, 9.2.8, 9.2.10, 9.3.1, 9.3.3, 9.3.4, 9.3.6, 9.4.6 | пп. 1.6.2.4, 1.6.2.5, 1.6.2.8, 1.6.3.3-1.6.3.5, 1.6.4.5 | пп. 10.2.4, 10.2.5, 10.2.8, 10.3.3-10.3.5, 10.4.5 | пп. 7.27, 7.30-7.33, 7.35, 9.20 |
| Прочность ветви при растяжении | пп. 5.1, 5.6 | пп. 5.1, 5.6 | пп. 8.1.1, 8.2.1 | пп. 7.1.1, 7.2.1 | пп. 1.4.1.3, 1.4.2.1 | пп. 8.1.3, 8.2.1 | пп. 7.1, 7.6 |
| Устойчивость ветви при сжатии | пп. 5.3, 5.6 | пп. 5.3, 5.6 | пп. 8.1.3, 8.2.3-8.2.5 | пп. 7.1.3, 7.2.3-7.2.5 | пп. 1.4.1.3, 1.4.2.3, 1.4.2.4 | пп. 8.1.3, 8.2.3, 8.2.4 | пп. 7.3, 7.6 |
| Устойчивость ветви при сжатии (закритическая работа) | пп. 5.3, 5.6, 7.20* | пп. 5.3, 5.6, 7.30 | пп. 8.1.3, 8.2.3-8.2.5, 8.3.5 | пп. 7.1.3, 7.2.3-7.2.5, 7.3.6 | пп. 1.4.1.3, 1.4.2.3, 1.4.2.4, 1.4.3.5 | пп. 8.1.3, 8.2.3, 8.2.4, 8.3.5 | пп. 7.3, 7.6, 9.20 |

| Проверка | Ссылка на СНиП II-23-81* | Ссылка на СНиП РК 5.04-23-2002 | Ссылка на СП 53-102-2004 | Ссылка на СП 16.13330 | Ссылка на ДБН В.2.6-163:2010 | Ссылка на ДБН В.2.6-198:2014 | Ссылка на ШНК 2.03.05-13 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Чрезмерные деформации растянутого волокна ветви | п. 5.28 | п. 5.28 | п. 10.1.3 | п. 9.1.3 | п. 1.6.1.3 | п. 10.1.3 | п. 7.28 |
| Устойчивость плоской формы изгиба ветви | п. 5.15 | п. 5.15 | п. 9.4.1 | п. 8.4.1 | п. 1.5.4.1 | п. 9.4.1 | п. 7.15 |
| Гибкость стенки ветви из условия местной устойчивости | пп. 7.1. 7.2*, 7.3, 7.4*–7.6*, 7.9, 7.10; пп. 7.14, 7.16*, 7.17*, 7.18*, табл. 27* | пп. 7.1. 7.2, 7.3, 7.4–7.6, 7.9, 7.10; 7.23, 7.26, 7.27, 7.28 | п. 8.3.2, табл. 8; п. 8.3.10; п. 9.5.1–9.5.9; п. 10.4.2, табл. 20; п. 10.4.3; п. 10.4.9 | п. 7.3.2, табл. 9; п. 7.3.11; п. 8.5.1–8.5.9; п. 9.4.2, табл. 22; п. 9.4.3; п. 9.4.9 | п. 1.4.3.2, табл. 1.4.3; п. 1.5.5.1–1.5.5.9; п. 1.6.4.2, табл. 1.6.3; п. 1.6.4.5 | п. 8.3.2, табл. 8.3; п. 9.5.1–9.5.9; п. 10.4.2, табл. 10.3; п. 10.4.5 | пп. 9.1 – 9.7, 9.10, 9.11; пп. 9.15, 9.16, 9.17, 9.18 |
| Гибкость свеса полки ветви из условия местной устойчивости | п. 7.22*, 7.23*, табл. 29*, п. 7.24, табл. 30; п. 7.27* | пп. 7.32, 7.33, 7.34, 7.37 | п. 8.3.7, табл. 9; п. 8.3.10; п. 9.5.14; п. 10.4.7, табл. 21; п. 10.4.9 | п. 7.3.8, табл. 10; п. 7.3.11; п. 8.5.18; п. 9.4.7, табл. 23; п. 9.4.9 | п. 1.4.3.7, табл. 1.4.4; п. 1.5.5.14; п. 1.6.4.8, табл. 1.6.4; п. 1.6.4.7 | п. 8.3.7, табл. 8.4; п. 9.5.14; п. 10.4.8, табл. 10.4; п. 10.4.7 | пп. 9.22, 9.23, пп. 9.24, 9.27 |
| Прочность раскосов решетки | п. 5.8*, 5.10 | пп. 5.8, 5.10 | пп. 8.2.7, 8.2.9 | пп. 7.2.7, 7.2.9 | пп. 1.4.2.7, 1.4.2.9 | пп. 8.2.7, 8.2.9 | пп. 7.8, 7.10 |
| Прочность стоек решетки | п. 5.8*, 5.10 | пп. 5.8, 5.10 | пп. 8.2.7, 8.2.9 | пп. 7.2.7, 7.2.9 | пп. 1.4.2.7, 1.4.2.9 | пп. 8.2.7, 8.2.9 | пп. 7.8, 7.10 |
| Устойчивость раскосов решетки при сжатии | пп. 5.8*, 5.10, 5.3 | пп. 5.8, 5.10, 5.3 | пп. 8.2.7, 8.2.9, 8.1.3 | пп. 7.2.7, 7.2.9, 7.1.3 | пп. 1.4.2.7, 1.4.2.9, 1.4.1.3 | пп. 8.2.7, 8.2.9, 8.1.3 | пп. 7.8, 7.10, 7.3 |
| Устойчивость стоек решетки при сжатии | пп. 5.8*, 5.10, 5.3 | пп. 5.8, 5.10, 5.3 | пп. 8.2.7, 8.2.9, 8.1.3 | пп. 7.2.7, 7.2.9, 7.1.3 | пп. 1.4.2.7, 1.4.2.9, 1.4.1.3 | пп. 8.2.7, 8.2.9, 8.1.3 | пп. 7.8, 7.10, 7.3 |
| Гибкость в плоскости XoY | пп. 6.15, 6.16 | пп. 6.14, 6.15 | п. 11.4.1 | п. 10.4.1 | п. 1.9.4.1 | п. 13.4.1 | п. 8.18 |
| Гибкость в плоскости XoZ | пп. 6.15, 6.16 | пп. 6.14, 6.15 | п. 11.4.1 | п. 10.4.1 | п. 1.9.4.1 | п. 13.4.1 | п. 8.18 |

**Проверки балок**

| Проверка | Ссылка на СНиП II-23-81* | Ссылка на СНиП РК 5.04-23-2002 | Ссылка на СП 53-102-2004 | Ссылка на СП 16.13330 | Ссылка на ДБН В.2.6-163:2010 | Ссылка на ДБН В.2.6-198:2014 | Ссылка на ШНК 2.03.05-13 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Прочность при действии поперечной силы | п. 5.12 | п. 5.12 | п. 9.2.1 | п. 8.2.1 | п. 1.5.2.1 | п. 9.2.1 | п. 7.12 |
| Прочность при действии изгибающего момента | п. 5.12 | п. 5.12 | п. 9.2.1 | п. 8.2.1 | п. 1.5.2.1 | п. 9.2.1 | п. 7.12 |
| Устойчивость плоской формы изгиба при действии момента | п. 5.15 | п. 5.15 | п. 9.4.1 | п. 8.4.1 | п. 1.5.4.1 | п. 9.4.1 | п. 7.15 |
| Устойчивость плоской формы изгиба с учетом пластики | | | п. 9.4.6 | п. 8.4.6 | п. 1.5.4.6 | п. 9.4.6 | |

| Проверка | Ссылка на СНиП II-23-81* | Ссылка на СНиП РК 5.04-23-2002 | Ссылка на СП 53-102-2004 | Ссылка на СП 16.13330 | Ссылка на ДБН В.2.6-163:2010 | Ссылка на ДБН В.2.6-198:2014 | Ссылка на ШНК 2.03.05-13 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Гибкость стенки из условия местной устойчивости | пп. 7.1. 7.2*, 7.3, 7.4*–7.6*, 7.9,7.10 | пп. 7.1, 7.2, 7.3, 7.4–7.6, 7.9, 7.10 | пп. 9.5.1–9.5.9 | пп. 8.5.1–8.5.9 | пп. 1.5.5.1–1.5.5.9 | пп. 9.5.1–9.5.9 | пп. 9.1 – 9.7, 9.10, 9.11 |
| Гибкость свеса полки (поясного листа) из условия местной устойчивости | п. 7.24, табл. 30 | п. 7.34 | п. 9.5.14 | п. 8.5.18 | п. 1.5.5.14 | п. 9.5.14 | п. 9.24 |
| Соотношение высоты стенки балки к ее толщине | п. 7.4* | п. 7.4 | п. 9.5.3 | п. 8.5.3 | п. 1.5.5.3 | п. 9.5.3 | п. 9.5 |
| Прочность по приведенным напряжениям при одновременном действии изгибающего момента и поперечной силы | п. 5.14* | п. 5.14 | п. 9.2.1 | п. 8.2.1 | п. 1.5.2.1 | п. 9.2.1 | п. 7.14 |

**Проверки элементов фермы**

| Проверка | Ссылка на СНиП II-23-81* | Ссылка на СНиП РК 5.04-23-2002 | Ссылка на СП 53-102-2004 | Ссылка на СП 16.13330 | Ссылка на ДБН В.2.6-163:2010 | Ссылка на ДБН В.2.6-198:2014 | Ссылка на ШНК 2.03.05-13 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Прочность | п. 5.1 | п. 5.1 | п. 8.1.1 | п. 7.1.1 | п. 1.4.1.1 | п. 8.1.1 | п. 7.1 |
| Устойчивость в плоскости фермы | п. 5.3 | п. 5.3 | п. 8.1.3 | п. 7.1.3 | п. 1.4.1.3 | п. 8.1.3 | п. 7.3 |
| Устойчивость в плоскости фермы (закритическая работа) | п. 5.3, 7.20* | пп. 5.3, 7.30 | п. 8.1.3, 8.3.5 | п. 7.1.3, 7.3.6 | п. 1.4.1.3, 1.4.3.5 | п. 8.1.3, 8.3.5 | пп. 7.3, 9.20 |
| Устойчивость из плоскости фермы | п. 5.3 | п. 5.3 | п. 8.1.3 | п. 7.1.3 | п. 1.4.1.3 | п. 8.1.3 | п. 7.3 |
| Устойчивость из плоскости фермы (закритическая работа) | п. 5.3, 7.20* | пп. 5.3, 7.30 | п. 8.1.3, 8.3.5 | п. 7.1.3, 7.3.6 | п. 1.4.1.3, 1.4.3.5 | п. 8.1.3, 8.3.5 | пп. 7.3, 9.20 |
| Гибкость стенки из условия местной устойчивости | п. 7.1, 7.2*, пп. 7.14, табл. 27* | пп. 7.1, 7.2, 7.23 | п. 8.3.1, 8.3.2, табл. 8; п. 8.3.10 | п. 7.3.1, 7.3.2, табл. 9; п. 7.3.11 | п. 1.4.3.1, 1.4.3.2, табл. 1.4.3 | п. 8.3.1, 8.3.2, табл. 8.3 | пп. 9.1, 9.2, 9.3, 9.15 |
| Гибкость свеса полки (поясного листа) из условия местной устойчивости | п. 7.22*, 7.23*, табл. 29*, п. 7.27* | пп. 7.32, 7.33, 7.37 | п. 8.3.7, табл. 9; п. 8.3.10 | п. 7.3.8, табл. 10; п. 7.3.11 | п. 1.4.3.7, табл. 1.4.4 | п. 8.3.7, табл. 8.4 | пп. 9.22, 9.23, 9.27 |
| Тонкостенность трубы из условия местной устойчивости | п. 8.6 | п. 8.6 | п. 12.2.2 | п. 11.2.2 | п. 1.10.2.2 | п. 14.2.2 | п. 10.6 |

| Проверка | Ссылка на СНиП II-23-81* | Ссылка на СНиП РК 5.04-23-2002 | Ссылка на СП 53-102-2004 | Ссылка на СП 16.13330 | Ссылка на ДБН В.2.6-163:2010 | Ссылка на ДБН В.2.6-198:2014 | Ссылка на ШНК 2.03.05-13 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Местная устойчивость стенки трубы из расчета замкнутой круговой цилиндрической оболочки | пп. 8.5-8.13 | пп. 8.5-8.13 | пп. 12.2.1-12.2.8 | пп. 11.2.1-11.2.9 | пп. 1.10.2.1-1.10.2.9 | пп. 14.2.1-14.2.9 | пп. 10.5-10.13 |
| Устойчивость искривленного элемента | | | | | | | |
| Гибкость | пп. 6.1-6.4,6.16 | пп. 6.1-6.4, 6.15 | пп. 11.1.1-11.1.4, 11.4.1 | пп. 10.1.1-10.1.4, 10.4.1 | пп. 1.9.1.1-1.9.1.4, 1.9.4.1 | пп. 13.1.1-13.1.4, 13.4.1 | пп. 8.1-8.4, 8.18 |

По умолчанию для сквозных сечений в программе не задаются параметры соединительной решетки. Соответственно, при расчете не проверяются элементы решетки, а при проверке устойчивости предполагается, что шаг решетки для сечения из уголков «коробочкой» равен *min*(B, H), а для сечений из парных швеллеров и парных двутавров — величине B. В вычислительном комплексе **SCAD** при проверке стальных решетчатых стержней, подверженных действию осевой силы с изгибом (см. соответствующий раздел СНиП II-23-81*, п.п. 5.24* — 5.36), принято, что ветви решетчатого стержня ***всегда*** соединены между собой планками (см. режим «Сопротивление сечений» программы **Кристалл**). Все остальные данные о соединительных планках не конкретизированы, вследствие этого в вычислительном комплексе **SCAD** не выполняются проверки прочности соединительной решетки (при необходимости проверки прочности решетки следует воспользоваться программой **Кристалл**, выбрав при этом требуемый тип решетки). Принятое решение ***всегда*** идет в запас прочности ветвей при проверке их по п.п. 5.24* и 5.25* СНиП II-23-81*, так как в ветвях появляется изгибающий момент от действия условной поперечной силы в планках. Этот момент действует на ветвь в плоскости, параллельной плоскостям расположения планок.

Для сквозных сечений при нажатии маркера **Назначить параметры решетки** появляется страница **Параметры решетки** (рис. 20.16-2), на которой пользователю предоставляется возможность задать детальную информацию о решетке для сквозных сечений, в том числе задать поперечное сечение планок или элементов решетки (раскосов, распорок), шаг планок или распорок.

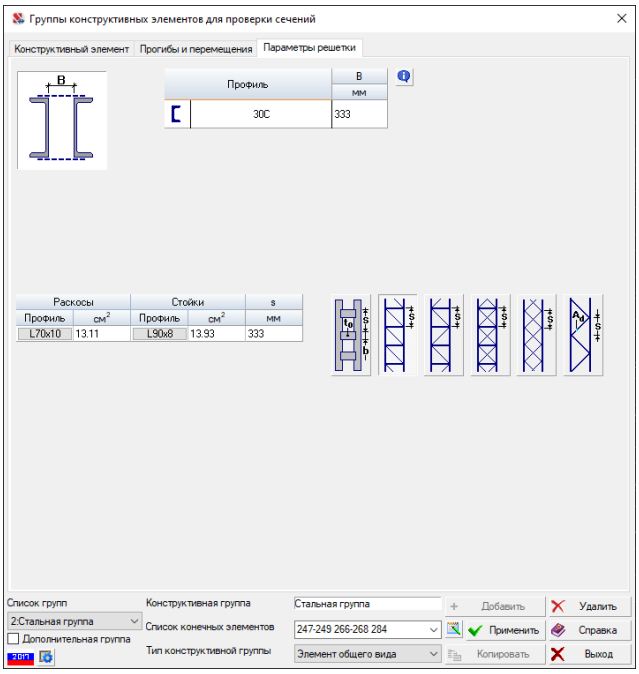



Рис. 20.16-2. *Страница* **Параметры решетки**

Поскольку требование норм относительно ограничения гибкости растянутого элемента связано с ограничением его провисания от собственного веса, то проверка гибкости растянутых элементов регламентирована только в вертикальной плоскости (например, согласно примечанию 1 к табл. 33 СП 16.13330).

Для **элементов ферм** предполагается, что вертикальной является именно плоскость фермы. Гибкость растянутых элементов фермы из плоскости фермы не проверяется. Соответственно, раскрепление нижнего (растянутого) пояса из плоскости фермы не влияет на результат проверки его гибкости. В том случае, если пользователю необходимо выполнить проверку гибкости растянутых элементов из плоскости фермы (для горизонтальных ферм, или для ферм, расположенных под углом к горизонту), можно использовать тип **Элемент общего вида**. При проверочном расчете такого растянутого элемента проверке подлежат обе его гибкости, поскольку само понятие вертикальной плоскости в данном режиме отсутствует.

## Особенности реализации

1. Формально при внецентренном сжатии (например, при действии $N,M_y,M_z$) в нормах нет требования проверки устойчивости при центральном сжатии. Однако без проверки того, что устойчивость при центральном сжатии обеспечена, другие проверки могут потерять смысл. Например, величина предельной гибкости типа 180-60α может стать отрицательной (величина α совпадает с фактором по устойчивости при центральном сжатии). Поэтому факторы по устойчивости при центральном сжатии вычисляются всегда.

2. Рекомендации норм в части определения коэффициента влияния формы сечения η для сварного неравнополочного двутавра ограничиваются случаем, когда отношение площади меньшей полки к площади большей полки составляет 0,5. Для случаев, когда такое соотношение превышает 0,5 при определении коэффициента влияния формы сечения η в программе предусмотрена линейная интерполяция между значениями η, вычисленными для равнополочного двутавра, и значениями η, вычисленными для неравнополочного двутавра с отношением площади меньшей полки к площади большей полки 0,5. Такой подход рекомендован в Изменении № 1 к ДБН В.2.6-198:2014.

Если в качестве норм проектирования стальных конструкций выбран EN 1993, то проводятся следующие проверки:

| Фактор | Ссылка на EN 1993-1-1 | Ссылка на EN 1993-1-5 |
|---|---|---|
| Прочность при действии продольной силы $N$ растяжения | 6.2.3 (6.5), (6.6) | |
| Прочность при действии продольной силы $N$ сжатия | 6.2.4 (6.9)…(6.11) | 4.4 (4.1)...(4.4), табл. 4.1, 4.2 |
| Прочность при действии изгибающего момента $M_y$ | 6.2.5 (6.12)…(6.15) | 4.4 (4.1)...(4.4), табл. 4.1, 4.2 |
| Прочность при действии изгибающего момента $M_z$ | 6.2.5 (6.12)…(6.15) | 4.4 (4.1)...(4.4), табл. 4.1, 4.2 |
| Прочность при действии поперечной силы $V_z$ | 6.2.6 (6.17)…(6.20) | |
| Прочность при действии поперечной силы $V_y$ | 6.2.6 (6.17)…(6.20) | |
| Прочность при действии изгибающего момента $M_z$ и поперечной силы $V_y$ | 6.2.5 (6.12)…(6.15), 6.2.8 (6.29), (6.30) | 4.4 (4.1)...(4.4), табл. 4.1, 4.2 |
| Прочность при действии изгибающего момента $M_y$ и поперечной силы $V_z$ | 6.2.5 (6.12)…(6.15), 6.2.8 (6.29), (6.30) | 4.4 (4.1)...(4.4), табл. 4.1, 4.2 |
| Прочность при действии изгибающего момента $M_y$ и продольного усилия $N$ | 6.2.5 (6.12)…(6.15), 6.2.9 (6.36)…(6.44) | 4.4 (4.1)...(4.4), табл. 4.1, 4.2 |
| Прочность при действии изгибающих моментов $M_y$, $M_z$, продольного усилия $N$ и поперечных сил $V_z$ и $V_y$ | 6.2.5 (6.12)…(6.15), 6.2.9 (6.36)…(6.44), 6.2.10 (6.45) | 4.4 (4.1)...(4.4), табл. 4.1, 4.2 |
| Устойчивость при изгибном выпучивании относительно оси y-y при действии сжимающего продольного усилия $N$ | 6.3.1 (6.46)…(6.51) | |
| Устойчивость при изгибном выпучивании относительно оси z-z при действии сжимающего продольного усилия $N$ | 6.3.1 (6.46)…(6.51) | |
| Устойчивость при изгибно-крутильном и крутильном выпучивании при действии сжимающего продольного усилия $N$ | 6.3.1 (6.46)…(6.49), 6.3.1 (6.52), (6.53) | |
| Устойчивость плоской формы изгиба при действии изгибающего момента $M_y$ | 6.3.2 (6.54)...(6.56) | |
| Устойчивость плоской формы изгиба при действии изгибающего момента $M_z$ | 6.3.2 (6.54)...(6.56) | |
| Устойчивость при совместном действии продольного усилия и изгибающих моментов | 6.3.3 (6.61), (6.62) | |
| Устойчивость при совместном действии продольного усилия и изгибающих моментов с учетом выпучивания плоской формы изгиба | 6.3.3 (6.61), (6.62) | |
| Устойчивость стенки при действии поперечной силы $V_z$ | | 5.2 (5.1), (5.2), 5.3 (5.3)...(5.6), 5.4 (5.8), (5.9), 5.5 (5.10) |
| Устойчивость стенки при действии поперечной силы $V_y$ | | 5.2 (5.1), (5.2), 5.3 (5.3)...(5.6), 5.4 (5.8), (5.9), 5.5 (5.10) |

## О формулах (49) и (50) СНиП II-23-81*

Формула (49) не вызывает никаких нареканий для сечений типа прямоугольного, где имеется характерная угловая точка А (рис. 20.16-3), в которой суммируются условные напряжения $M_x/(c_x W_{xn,\min} R_y \gamma_c)$ и $M_y/(c_y W_{yn,\min} R_y \gamma_c)$.

В сечениях без такой угловой точки (рис. 20.16-4) суммирование напряжений выполнить невозможно. В этом смысле более правильно построена формула (50) СНиП II-23-81*, где имеется возможность перебирать координаты $x$ и $y$ различных точек сечения. Отмеченная проблема актуальна также для СП и ДБН.

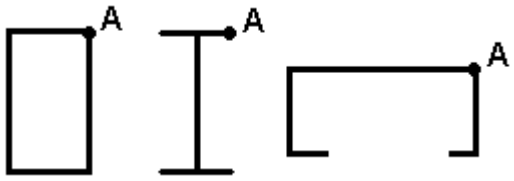



Рис. 20.16-3. *Сечения с угловой точкой*

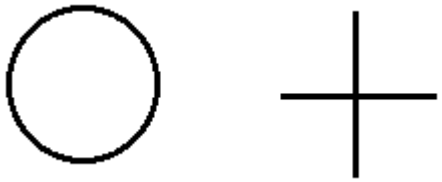


Рис. 20.16-4. *Сечения без угловой точки*

На указанное различие рассматриваемых случаев обратил внимание Л.Б. Кацнельсон (ЦНИИСК), которому авторы разработки признательны за инициативу рассмотрения этого и многих других моментов реализации норм.

## 20.17.О сейсмических и особых воздействиях

Если в расчетное сочетание вошло сейсмическое воздействие, то в комплексе **SCAD** автоматически учитывается требование выбранного нормативного документа относительно ввода дополнительного коэффициента условий работы. Так, при расчете на прочность и устойчивость с учетом сейсмической нагрузки, для СП 14.13330.2014 «Строительство в сейсмических районах» согласно п. 5.15 вводится коэффициент $m_{tr}$. Аналогичный коэффициент учитывается и для других нормативных документов, например, ДБН В.1.1-12:2014 (Украина), КМК 2.01.03-96 (Республика Узбекистан) и др.

В специальной таблице можно ввести коэффициенты учета сейсмического воздействия при расчетах на прочность и расчетах на устойчивость. По умолчанию, если заданы нули, значения принимаются согласно соответствующим сейсмическим нормам. Введя, например, эти два коэффициента равными 0,9, можно учесть требования норм по расчету стальных конструкций, подлежащих эксплуатации в неотапливаемых помещениях или на открытом воздухе при расчетной температуре ниже минус 40°С.

Если комбинирование нагрузок и воздействий выполняется по СП 20.13330, то в специальной таблице появляется возможность задать коэффициент условий работы, который будет использоваться при расчете на действие комбинаций загружений включающих особые (несейсмические) загружения в соответствии с приложением Б к СП 296.1325800.2017 или приложением А к СП 385.1325800.2018 (кроме того, для таких комбинаций будет использоваться коэффициент надежности по ответственности $\gamma_n$=1,0 в соответствии с п. 5.5 СП 296.1325800.2017). Может быть так же учтен дополнительный коэффициент условий работы, понижающий расчетное сопротивление, использование которого оговорено в п. 5.11 и приложении В к СП 296.1325800.2017.

Отметим, что есть несоответствие между СП 296.1325800 и СП 385.1325800. СП 296.1325800 вводит коэффициент условий работы для пластичных сталей равный 1,1, но при этом говорит о необходимости расчета на основании требований, которые предъявляются к расчетам на прогрессирующее обрушение (СП 385.1325800). В изменении № 1 к СП 385.1325800 приводится коэффициент условий работы равный 1,2. В программе используется значение 1,2.

## 20.18.Расчет «нестандартных» сечений

СНиП II-23-81* и другие нормативные документы регламентируют проверку только ограниченного набора форм сечений. Тем не менее, в проектной практике часто возникает необходимость использования сечений с формой, не оговоренной нормами. В комплексе **SCAD** предусмотрена возможность задания жесткостных характеристик стержней, используя данные, полученные с помощью набора программ формирования сечений (**Конструктор сечений**, **Консул**, **Тонус**).

В этом случае при экспертизе сечений возникает проблема выбора расчетного сопротивления стали $\mathbf{R_y}$, величина которого зависит от толщины сечения. В программе принято, что для произвольных сечений с явно указанной маркой стали величина расчетного сопротивления $\mathbf{R_y}$ будет принята по следующим правилам:

- для сечений, созданных программой **Консул** — минимальное значение расчетного сопротивления стали данной марки;
- для сечений, созданных программой **Тонус** — значение расчетного сопротивления стали самой толстой полоски (если данная толщина отсутствует в соответствующей таблице нормативного документа, то будет взято минимальное значение расчетного сопротивления стали данной марки);
- для сечений, созданных программой **Конструктор Сечений** — значение расчетного сопротивления стали самого толстого листа или фасонного проката (если данная толщина отсутствует в соответствующей таблице нормативного документа, то будет взято минимальное значение расчетного сопротивления стали данной марки); если сечение

сформировано только из фасонного проката, то будут использоваться данные норм для фасона, в противном случае — данные норм для листовой стали.

Исходя из соображений расчета «в запас надежности» при расчете также принимаются самые неблагоприятные значения коэффициента влияния формы сечения η, коэффициентов α и β и др. Проверка устойчивости плоской формы изгиба вообще не выполняется в предположении, что возможность такой формы потери устойчивости исключена применением соответствующих раскреплений.

СНиП, ДБН и другие аналогичные нормативные документы регламентируют выполнять расчет сечений на действие поперечных сил по формулам, которые трудно адаптировать к случаю сечения произвольной формы. Поэтому при анализе прочности произвольного сечения на действие поперечных сил программа использует предлагаемый Еврокодом подход, при котором сравниваются усредненные касательные напряжения, вычисляемые как отношение поперечной силы к сдвиговой площади, и расчетное сопротивление на срез.

## 20.19.Отображение результатов



Результаты проверки несущей способности могут отображаться на схеме для всех конструктивных элементов, групп конструктивных элементов или групп унификации, а также для каждого конструктивного элемента или группы элементов в отдельности.

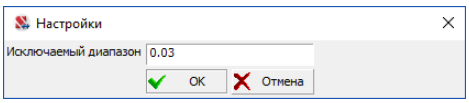



Рис. 20.19-1. *Диалоговое окно* **Настройки**

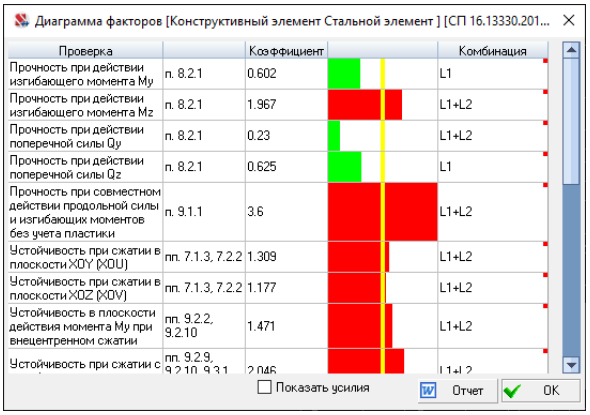
При использовании операции отображения, которая активируется кнопкой **Отображение результатов проверки на схеме (3-х цветная шкала)** —  , конструктивные элементы отображаются на схеме тремя цветами — зеленым, если несущая способность достаточна, красным — в противном случае или желтым, если несущая способность находится вблизи критического значения (фактор близок к 1,0). Критический диапазон задается путем настройки цветовой шкалы (кнопка  в окне шкалы). Например, если в диалоге (рис. 20.19-1) задать величину 0,03, то все элементы с величиной фактора меньше 0.97 будут окрашены в зеленый цвет, при факторе больше 1,03 — в красный, а в том случае, когда фактор находится в диапазоне [0,97;1,03] — будет использован желтый цвет.

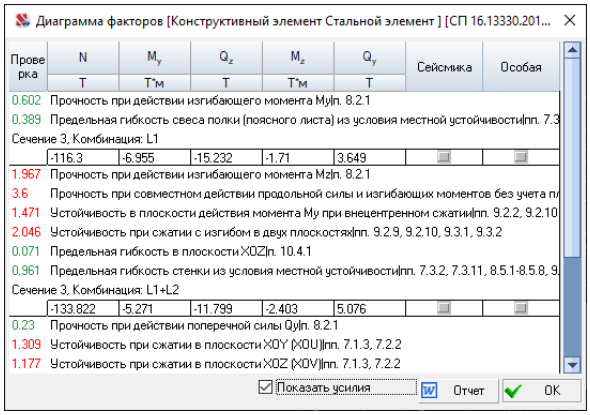
При использовании режима отображения, который активируется кнопкой **Отображение результатов проверки на схеме (полноцветная шкала) —**  появится обычная цветовая шкала с настраиваемым количеством цветов.

Если в выпадающем списке не выбрана ни одна группа конструктивных элементов, то производится визуализация критического фактора $\mathbf{K_{max}}$. Если выбрана конкретная группа, то в списке факторов появится полный перечень произведенных проверок и на схеме можно отобразить и результаты проверки по каждому из факторов, определяющих несущую способность объектов проверки (например, прочности или устойчивости). Для предварительной оценки (эскизное проектирование), кроме коэффициента использования ограничения $\mathbf{K_{max}}$, предусмотрена также визуализация цветовой шкалы коэффициента использования ограничения без учета факторов по гибкостям и факторов по местной устойчивости. Значения выбранного фактора можно вывести на схему, воспользовавшись кнопкой фильтров **Оцифровка** —  .

Для визуализации результатов по каждому конструктивному элементу или унифицированной группе следует выбрать имя объекта в соответствующем списке и нажать кнопку **Выборочная визуализация результатов**  . В результате открывается диалоговое окно **Диаграмма факторов** (рис. 20.19-2а), в котором по каждому фактору проверки выводится коэффициент использования.

Красным цветом на диаграмме будут отмечены факторы, у которых коэффициент использования несущей способности превышает единицу. Маркер **Показать усилия** позволяет получить альтернативное представление информации, при котором будут показаны усилия/напряжения в элементе (рис. 20.19-2,*б*).




*а*) *б*)

Рис. 20.19-2. *Диалоговое окно*
**Диаграмма факторов**

Для анализа несущей способности каждого элемента конструктивной группы используется диалоговое окно **Элементы группы**, показанное на рис. 20.19-3, которое вызывается нажатием кнопки **Состав группы конструктивных элементов** —  .

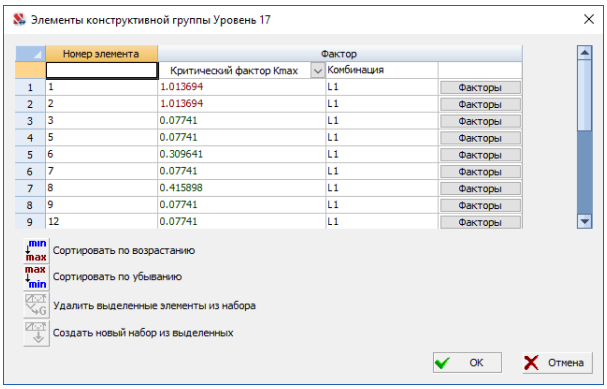



Рис. 20.19-3. *Диалоговое окно*
**Элементы конструктивной группы**

Для вызова окна следует выбрать в списке инструментальной панели имя исследуемой группы и нажать указанную кнопку. Главным информационным элементом окна является таблица, в которой записаны номера элементов, входящих в выбранную группу, значения коэффициентов использования по фактору, установленному в первой строке таблицы, а также кнопки **Факторы**, с помощью которых можно получить коэффициенты использования несущей способности для отдельного элемента.

С помощью кнопок, расположенных под таблицей, выполняются следующие действия:

- сортировка элементов (по возрастанию  или убыванию  ) выбранного фактора;
-  — удаление отмеченных в таблице элементов из состава группы;
-  — создание нового набора из маркированных элементов — создается новая группа элементов, в которую входят элементы с активными маркерами (эти элементы из текущей группы удаляются).

Дополнительные возможности для анализа несущей способности элементов стальных конструкций, входящих в состав конструктивных групп, предоставляют операции **Сталь. Факторы** и **Сопротивление сечений**, которые вызываются из диалогового окна **Информация об элементе** (кнопка  на панели фильтров). Эти операции реализованы по тем же правилам, что и соответствующие операции программы **Кристалл**[1].

**Сталь. Факторы** — позволяет получить диаграмму факторов для выбранного элемента (рис. 20.19-2,*а*) по результатам экспертизы сечений. Маркер **Показать усилия** позволяет получить альтернативное представление информации, при котором будут показаны усилия/напряжения в элементе (рис. 20.19-2,*б*).

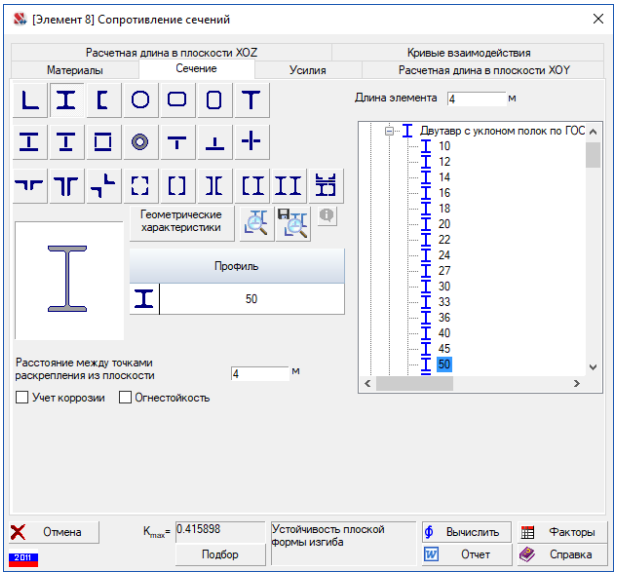



Рис. 20.19-4. *Диалоговое окно* **Сопротивление сечений**

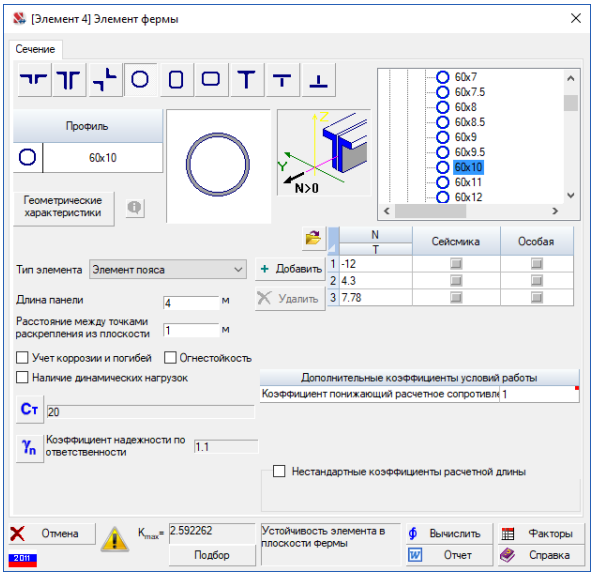



Рис. 20.19-5. *Диалоговое окно* **Элемент фермы**

**Сопротивление сечений** — позволяет провести расширенный анализ несущей способности сечений. Исходные данные для выполнения экспертизы включают информацию о конечном элементе (длина, сечение), а также параметры конструктивной группы, в которую входит анализируемый элемент. Если стержневой элемент является частью конструктивного элемента, то в качестве длины будет передана длина конструктивного элемента. Усилия на одноименной странице соответствуют РСУ этого элемента. В процессе экспертизы допускается изменение различных параметров, например, коэффициента условий работы, стали и др., что позволяет проанализировать их влияние на несущую способность элемента. Если конструктивная группа, в состав которой входит элемент, определена как элемент фермы, то нажатие кнопки **Сопротивление сечений** (рис. 20.19-4) приведет к появлению окна с параметрами расчета элементов ферм (рис. 20.19-5).

## 20.20.Формирование отчета



По результатам проверки можно сформировать отчет. Он формируется в формате **RTF** и автоматически загружается в ассоциированное с этим форматом приложение (например, MS Word или WordPad). Перед формированием отчета появляется диалоговое окно (рис. 20.20-1), в котором следует выбрать конструктивные элементы и/или группы конструктивных элементов, информация по которым должна попасть в отчет.

В окне предусмотрены следующие опции управления выводом:

[1] В.С. Карпиловский, Э.З. Криксунов, А.А. Маляренко, М.А. Микитаренко, А.В. Перельмутер, М.А. Перельмутер, В.Г. Федоровский, В.В. Юрченко «SCAD Office. Реализация СНиП в проектирующих программах» — М.: СКАД СОФТ, 2014 — 480с.

- **Для всех групп и конструктивных элементов** — в отчет попадут все конструктивные группы из списка;
- **Только для указанных групп и конструктивных элементов** — в отчете будет информация только об отмеченных в списке группах;
- **Для указанных элементов** — в этом случае в поле ввода нужно ввести номера конечных элементов, для которых следует сформировать отчет.

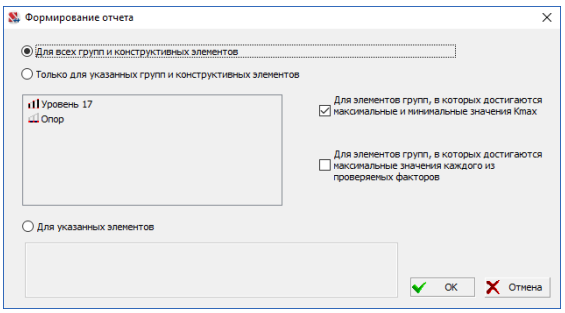



Рис. 20.20-1. *Диалоговое окно*
**Формирование отчета**

Кроме того, маркеры **Для элементов групп, в которых достигаются максимальные и минимальные значения $K_{max}$** и **Для элементов групп, в которых достигаются максимальные значения каждого из проверяемых факторов** позволяют получить отчет только для элементов, в которых факторы достигают максимума.

## 20.21.Экстремальные значения факторов

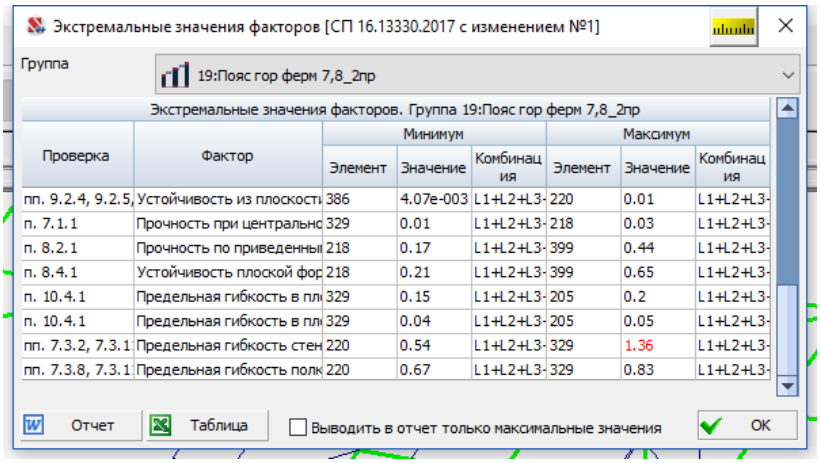



Рис. 20.21-1. *Диалоговое окно*
**Экстремальные значения факторов**

Данная операция позволяет для выбранной группы конструктивных элементов или конструктивного элемента сформировать таблицу (рис. 20.21-1), включающую следующую информацию:

- список факторов;
- минимальное и максимальное значение каждого фактора;
- номера конечных элементов, на которых реализовались значения минимума и максимума.

Выбор группы или конструктивного элемента выполняется из списка, расположенного в верхней части диалогового окна. Кнопки **Отчет** и **Таблица** активируют создание отчетных документов в соответствующих форматах для выбранной группы. Специальный маркер позволяет получить отчет, в котором содержатся только максимальные значения факторов.

## 20.22.Создание элементов технической спецификации стали



Данная операция позволяет объединить конструктивные элементы и/или группы конструктивных элементов в специальные группы элементов конструкций, которые в дальнейшем будут использоваться для генерирования технической спецификации стали (см. раздел 20.23).

При активации данной операции появляется диалоговое окно (рис. 20.22-1) аналогичное тому, которое используется при создании групп унификации.

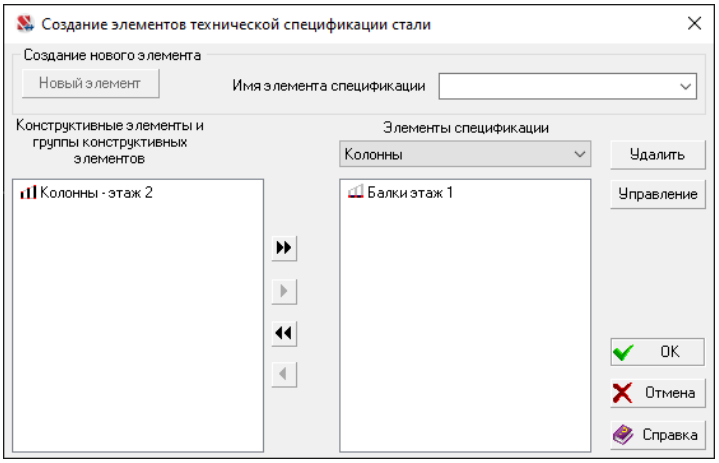



Рис. 20.22-1. *Диалоговое окно* **Создание элементов технической спецификации стали**

В выпадающем списке **Имя элемента спецификации** можно задать имя элемента или выбрать одно из стандартных имен (которое после этого можно отредактировать). Списки стандартных имен хранятся в файлах

%AllUsersProfile%\SCAD Soft\SteelSpecification1049.txt (при использовании русского языка)
%AllUsersProfile%\SCAD Soft\SteelSpecification1033.txt (при использовании английского языка)

Пользователь может внести изменения в эти файлы и тем самым подготовить свой собственный список стандартных наименований элементов спецификации.

Кнопка **Управление** позволяет вызвать диалоговое окно (рис. 20.22-2), в котором можно изменить порядок вывода групп в отчетном документе (кнопки **Вверх**/**Вниз**) и/или поменять имена групп.

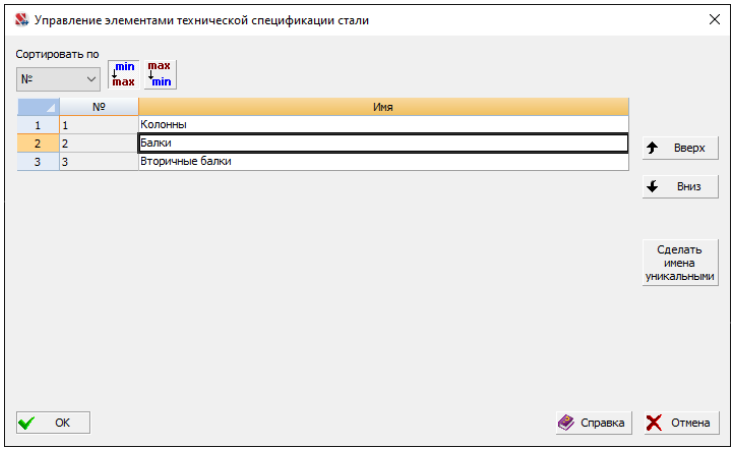



Рис. 20.22-2. *Диалоговое окно* **Управление элементами технической спецификации стали**

## 20.23.Расход стали



Данная операция позволяет оценить суммарный расход стали для расчетной модели. Диалоговое окно, которое появляется при активации данной операции (рис. 20.23-1), является многостраничным.

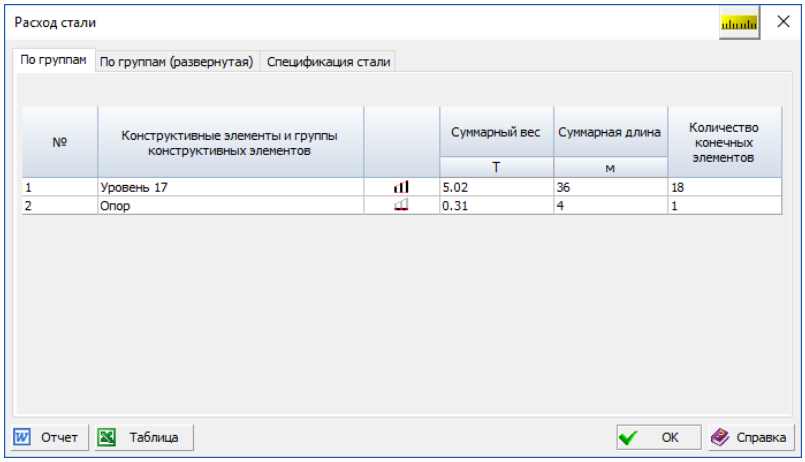



Рис. 20.23-1. *Диалоговое окно* **Расход стали**

Первая страница **По группам** окна **Расход стали** позволяет для каждого конструктивного элемента и каждой группы конструктивных элементов получить в табличной форме информацию о расходе стали (столбец **Суммарный вес**), суммарной длине гибких частей конечных элементов (столбец **Суммарная длина**), а также о количестве конечных элементов, которые принадлежат данной группе конструктивных элементов или данному конструктивному элементу (рис. 20.23-1). При этом при вычислении веса стали используются площади поперечных сечений, которые заданы в жесткостных характеристиках.

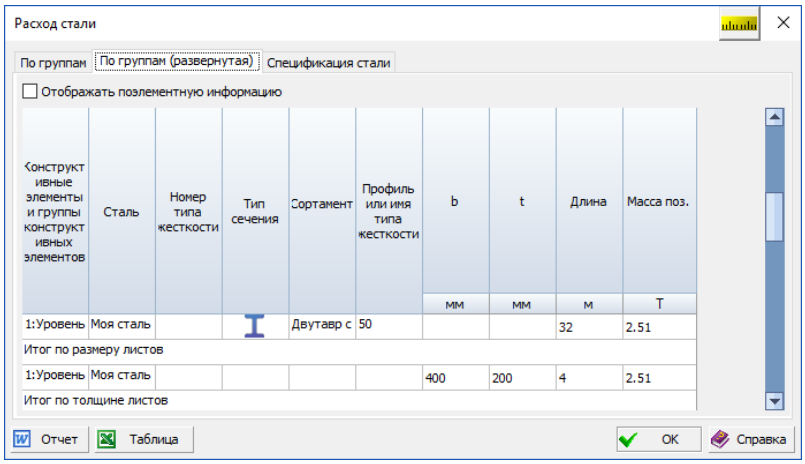



Рис. 20.23-2. *Страница* **По группам (развернутая)** *диалогового окна* **Расход стали**

Вторая страница **По группам (расширенная)** позволяет для каждого конструктивного элемента и каждой группы конструктивных элементов получить в табличной форме расширенную информацию о материале (столбец **Сталь**) и типе жесткости (столбцы **Номер типа жесткости** и **Имя типа жесткости**) с описанием типа сечения (столбец **Тип сечения**). В том случае, когда сечение задано прокатным, в столбце **Сортамент** отображается название соответствующего сортамента, а в столбце **Профиль** отображается номер профиля в сортаменте. Для сварных сечений для каждого элемента сечения (полки или стенки) генерируется отдельная строка таблицы с указанием профиля и размеров листового проката. Для каждой позиции таблицы указывается длина и масса (рис. 20.23-2).

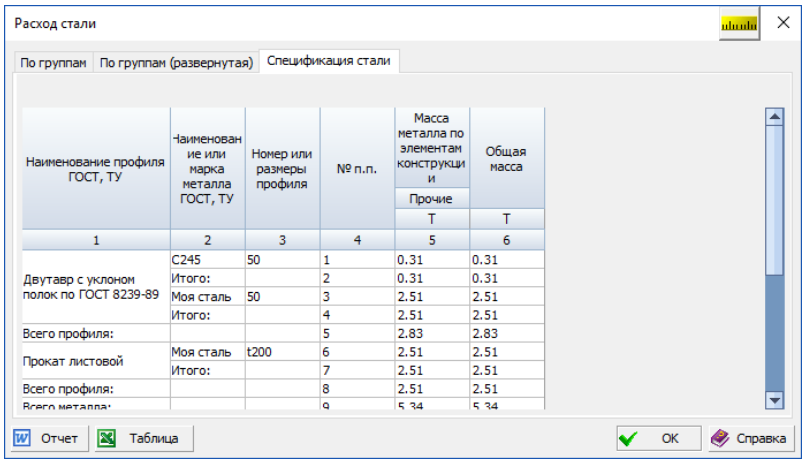



Рис. 20.23-3. *Страница* **Спецификация стали** *диалогового окна* **Расход стали**

Третья страница **Спецификация стали** представляет собой таблицу, близкую по форме и содержанию к технической спецификации стали по ГОСТ (рис. 20.23-3), которая генерируется в соответствии с созданными ранее элементами технической спецификации стали (см. раздел 20.22) если последние были заданы.

Кнопки **Отчет** и **Таблица** активируют создание отчетных документов в соответствующих форматах.

## 20.24.Выполнение подбора сечений



Подбор сечений элементов выполняется в тех случаях, когда их поперечные сечения заданы из прокатных профилей. В подборе могут участвовать конструктивные элементы, группы конструктивных элементов и унифицированные группы. Если элементы объединены в унифицированную группу, то в результате подбора все они получат одинаковые сечения.

Подбор выполняется в рамках сортамента, принятого при начальном назначении сечений элементов, и только для указанного вида профиля. Это означает, что если в качестве профиля был выбран двутавр вида **К**, то и в результате подбора будет выбран аналогичный профиль (или будет сообщено, что из таких профилей сечение не удается подобрать).

Результаты подбора отображаются в таблице диалогового окна **Результаты подбора сечений** (рис. 20.24-1). В столбце таблицы выводится имя группы или конструктивного элемента. Для конструктивных элементов выводятся – сечения элементов, жесткости которых использовались при расчете конструкции, исходное сечение, которое использовалось при подборе, и сечение, полученное в результате подбора (если он выполнен). В следующих трех столбцах дана информация о процентном изменении основных жесткостных характеристик (EF, $EI_y$, $EI_z$) после подбора и номер элемента в схеме, на котором этот максимум реализовался. Если по результатам подбора сортамент оказался исчерпан, а необходимая несущая способность не достигнута, то красным цветом выводится сообщение **Подбор произвести не удалось**, и информация о подборе в таблице будет отсутствовать.

Для групп конструктивных элементов в таблице приведено имя группы, а вся информация относительно результатов подбора выводится в диалоговом окне **Результаты подбора сечений** [*имя группы*] (рис. 20.24-2), которое вызывается после двойного щелчка левой кнопки мыши в строке с именем группы. В таблице, размещенной в этом окне, содержатся данные о результатах подбора для каждого элемента группы.

В случае если не удалось хотя бы для одного элемента данной группы выполнить подбор, то красным цветом будет выведено сообщение.

Для групп унификаций в таблице приведено только имя группы унификации, а вся информация относительно результатов подбора выводится в диалоговом окне, которое вызывается после щелчка левой кнопки мыши в строке с именем группы унификации.

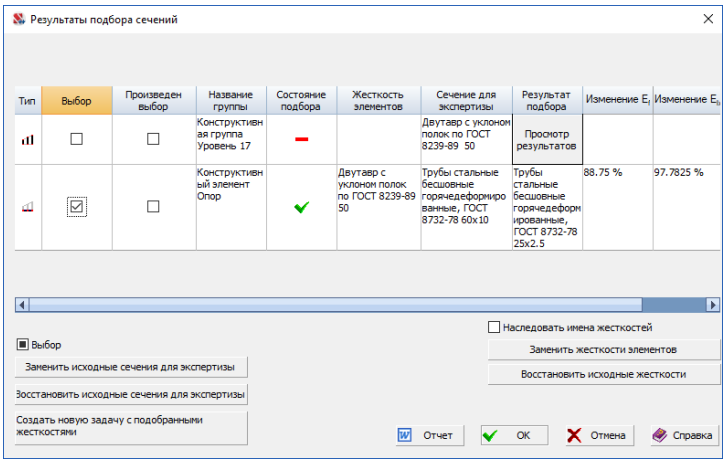



Рис. 20.24-1. *Диалоговое окно* **Результаты подбора сечений**

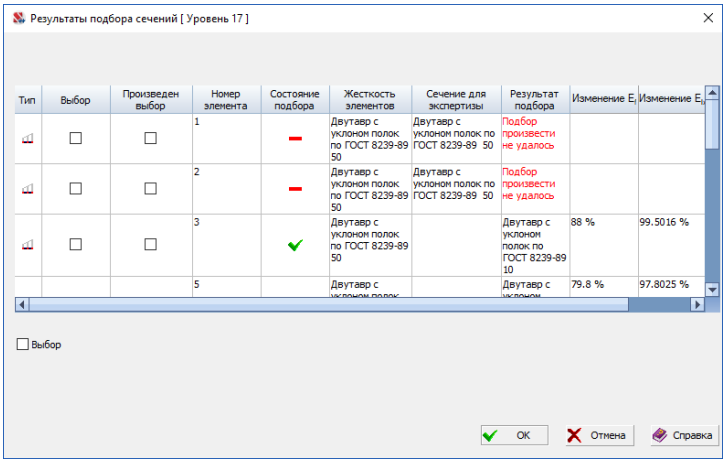



Рис. 20.24-2. *Диалоговое окно* **Результаты подбора сечений**

По результатам подбора может быть сформирован отчет (кнопка **Отчет**  ). Отчет формируется в виде файла в формате **.rtf**, который автоматически загружается в ассоциированное с этим форматом приложение (рис. 20.24-3).

Если в результате работы операции подбора изменились сечения элементов, то в окне **Результаты подбора сечений** может быть назначен один из вариантов продолжения работы:

- сохранить результаты подбора, создав новую задачу, в которой применены подобранные сечения как жесткости элементов;
- применить подобранные сечения как жесткости элементов в данной задаче. Необходимо при этом помнить, что после этой операции после завершения работы постпроцессора будет задан вопрос о ее подтверждении, т.к. данная операция предусматривает пересчет задачи;
- применить подобранные сечения как исходные сечения для экспертизы и последующего анализа;
- отказаться от применения результатов подбора (кнопка **Отмена**). При этом результаты подбора будут сохранены и могут затем использоваться в дальнейшем в информации о результатах подбора.

Перечисленные операции будут выполнены только для элементов, у которых активирован маркер, стоящий в первой графе таблицы.

Если в диалоговом окне **Результаты подбора сечений** (рис. 20.24-1) активен маркер **Наследовать имена жесткостей**, то после выполнения подбора и применения подобранных сечений последние будут иметь те же имена типов жесткости, что и исходные сечения.

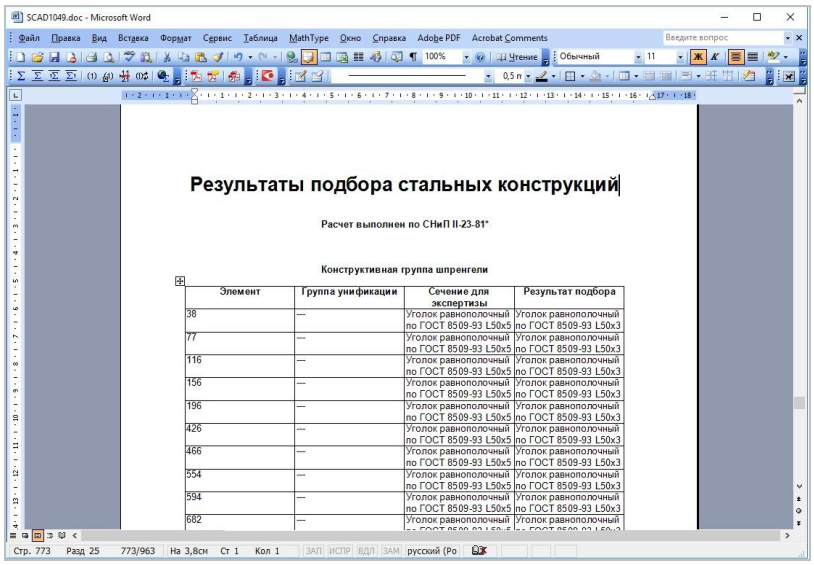



Рис. 20.24-3. *Отчет по результатам выполнения подбора сечений*

В результате подбора количество типов жесткости может существенно измениться. Рекомендуется перед расчетом воспользоваться операцией удаления дублирующихся жесткостей в разделе **Назначения** препроцессора.

## 20.25.Информация о результатах подбора



Информация о результатах подбора, представленная в диалоговых окнах на рис. 20.25-2, 20.25-3, доступна лишь во время работы режима **Подбор**. Если после выхода из этого режима для каких-либо целей потребуется вновь рассмотреть или использовать результаты подбора, то следует воспользоваться кнопкой **Отображение информации о сечениях** —  .

### Информация о работе постпроцессора

Если в постпроцессоре **Проверки несущей способности стальных сечений** использовались запросы на замену жесткостей элементов на основании результатов подбора (или на основании замены сечений в группах конструктивных элементов), то при выходе в дерево проекта появится описанное выше окно **Результаты подбора сечений** для подтверждения операции замены.

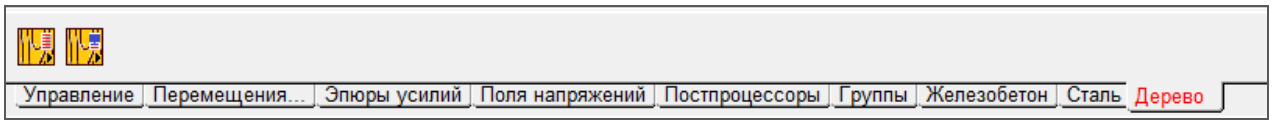
# 21. Проверка несущей способности деревянных сечений

Режим предназначен для **проверки (экспертизы)** несущей способности стержневых элементов деревянных конструкций в соответствии с требованиями СНиП II-25-80, КМК 2.03.08.98, СП 64.13330.2011 (2017).

В настоящей версии программы предусмотрен анализ стержней из цельной или клееной древесины прямоугольного, круглого или таврового сечения. Сечения задаются как параметрические или формируются с помощью программы **Конструктор сечений**. Управление операциями ввода исходных данных и анализа несущей способности сечений в элементах деревянных конструкций выполняется из раздела инструментальной панели **Дерево**. Элементы управления указанными операциями сосредоточены в двух инструментальных панелях:

 — Ввод данных;

 — Экспертиза сечений.




Обязательным условием для работы режима является наличие расчетных сочетаний усилий (РСУ). Следует обратить внимание на соответствие норм, заданных при формировании РСУ, и норм, использованных при анализе элементов деревянных конструкций.

## Ввод исходных данных

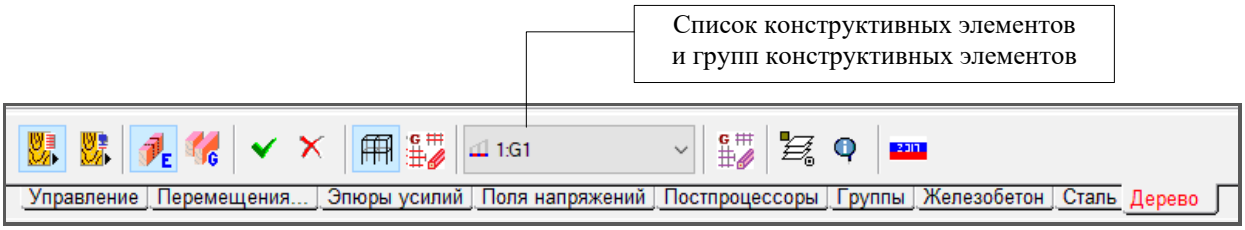



Рис. 21-1. *Инструментальная панель* **Ввод данных** *для расчета несущей способности элементов деревянных конструкций*

Инструментальная панель **Ввод данных** (рис. 21-1) включает кнопки вызова следующих операций:

 — назначение конструктивных элементов;

 — назначение групп конструктивных элементов;

 — подтверждение выбора конструктивных элементов;

 — сброс установленного режима;

 — отображение расчетной схемы;

 — выбор элементов активной группы;

 — управление группами деревянных конструктивных элементов;

 — режим визуализации активной группы (здесь как в изображении пиктограммы, так и на схеме используется фиолетовый цвет, в отличие от кнопки выбора группы, где использован — красный);

 — информация о группах деревянных конструктивных элементов;

 — смена норм проектирования.

Проверка несущей способности сечений элементов из дерева выполняется для **конструктивных элементов** или **групп конструктивных элементов**.

Конструктивный элемент моделирует физически однородный элемент конструкции — стойку рамы, пояс фермы и т. п.

**Геометрическая длина конструктивного элемента равна сумме длин конечных элементов, его образующих**.

В качестве конструктивного элемента рассматривается непрерывная цепочка стержневых конечных элементов, обладающая следующими свойствами:

- элементы, входящие в цепочку, лежат на одной прямой без разрывов (точность определяется параметром совпадения узлов);
- все элементы цепочки имеют одинаковый тип жесткости;
- все конечные элементы цепочки имеют одинаковый тип;
- у всех элементов цепочки одинаково ориентированы главные оси поперечного сечения;
- в конструктивном элементе допускается наличие жестких вставок, одинаковой длины и направления во всех узлах (под углом к продольной оси элемента), и/или разнонаправленных из тела стержня жестких вставок (в том числе и разной длины) вдоль продольной оси конструктивного элемента в первом и последнем его узлах.
- **элементы цепочки могут входить только в один конструктивный элемент**.

В некоторых случаях **конструктивный элемент может состоять только из одного стержневого конечного элемента**.

Когда необходимо рассмотреть ряд отдельных стержневых конечных элементов (например, стойки или раскосы фермы), то они могут быть объединены в **группы конструктивных элементов** (в дальнейшем — **конструктивные группы**). В этом случае проверка несущей способности выполняется для всех элементов конструктивной группы. Обязательным условием для элементов, входящих в группу, является одинаковый тип сечения. Кроме того, для всех элементов конструктивной группы будут использованы одни и те же коэффициенты расчетной длины (или расчетные длины).

Поскольку к конструктивным элементам и группам предъявляются перечисленные выше специальные требования, а контроль их выполняется в процессе назначения и расчета, то в этом случае обычные группы элементов не используются.



**Для всех элементов, входящих в состав конструктивных элементов и групп конструктивных элементов, должны быть вычислены расчетные сочетания усилий (РСУ).**

Конструктивные элементы и группы могут быть предварительно сформированы как в пре-, так и в постпроцессоре в разделе инструментальной панели **Группы** (операция **Элементы деревянных конструкций** —  ). Если при переходе к экспертизе сечений данные ранее сформированных конструктивных групп не требуют корректировки, режим ввода можно пропустить и сразу перейти к анализу сечений. В противном случае создание и/или корректировка конструктивных групп выполняется в разделе **Ввод данных** инструментальной панели **Дерево**.

## 21.1. Формирование новых конструктивных групп

При подготовке новых конструктивных групп рекомендуется придерживаться следующего порядка работы:

- выбрать на схеме (отметить) элементы, входящие в конструктивную группу;
- в разделе **Дерево** инструментальной панели выбрать операцию **Ввод данных** —  , после чего появится инструментальная панель подготовки исходных данных для анализа элементов деревянных конструкций;
- нажать одну из кнопок, соответствующую типу создаваемой группы:

-  — **Назначение конструктивных элементов**;
-  — **Назначение конструктивных групп**.

– нажать кнопку  — **Подтверждение** в инструментальной панели;
– в появившемся диалоговом окне **Конструктивный элемент** или **Группы конструктивных элементов для проверки сечений** задать параметры элемента или группы.

## 21.2. Назначение новых конструктивных элементов



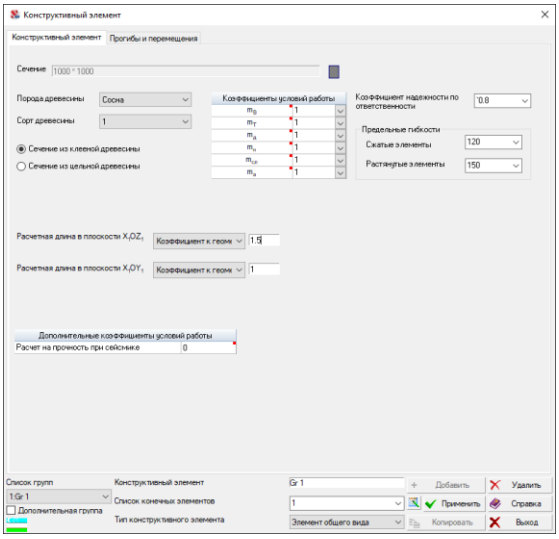



Рис. 21.2-1. *Диалоговое окно* **Конструктивный элемент**

В диалоговом окне **Конструктивный элемент** задаются следующие характеристики элемента: имя (задание обязательно), тип конструктивного элемента, порода и сорт древесины, маркеры использования цельной или клееной древесины, коэффициенты расчетной длины, коэффициент надежности по ответственности, коэффициенты условий работы и предельные гибкости, толщина доски и высота подъема для гнутых элементов (предполагается, что кривизна конструктивного элемента в расчетной схеме не учитывается).

### Расчетные длины

Коэффициенты расчетной длины являются множителями к геометрической длине конструктивного элемента и служат для определения расчетных длин конструктивного элемента (физически однородного стержня) в плоскостях главных осей инерции поперечного сечения. При их назначении следует исходить из расстояния между точками закрепления элемента в реальной конструкции и характера этого закрепления (жесткая или упругая опора, препятствие угловым или линейным перемещениям).

В программе предусмотрено задание информации либо в виде коэффициента расчетной длины, либо в виде расчетной длины. Переключение способа ввода данных осуществляется с помощью выпадающего списка, который расположен рядом с полем ввода:

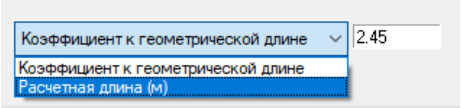



Рис. 21.2-2

## Учет максимально допустимых прогибов и перемещений

Учет максимально допустимых горизонтальных и вертикальных прогибов и перемещений выполняется в соответствии с рекомендациями выбранного для расчета нормативного документа. Например, в случае использования СП 20.13330.2011 проверки выполняются в соответствии с разделом Е.2.1 Приложения Е, а при работе с ДСТУ Б.В.1.2-3:2006 (Прогибы и перемещения) — в соответствии с пунктом 5.1 раздела 5.

Линией отсчета прогибов считается прямая, которая соединяет начало и конец гибкой части конструктивного элемента. Ниже на рисунке показан пример, в котором конструктивный элемент состоит из трех конечных элементов.

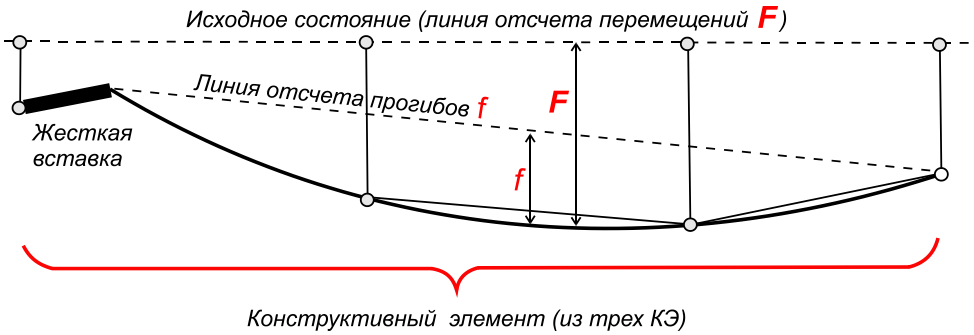
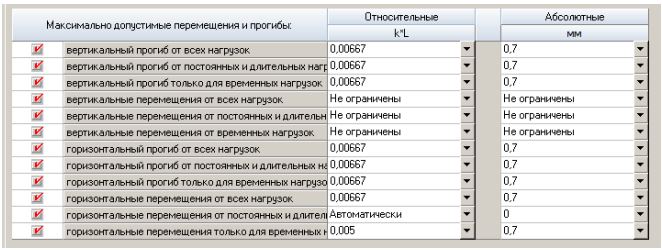



Рис. 21.2-3

Проверка выполняется на основе параметров, выбираемых из соответствующей таблицы на странице **Прогибы и перемещения**.




Предусмотрена возможность задания как относительных, так и абсолютных значений допустимых прогибов и перемещений. В первом случае рассматриваются следующие варианты учета перемещений (выбор варианта выполняется из выпадающего списка, соответствующей графы таблицы учета вертикальных перемещений):

- **Не ограничены** — прогибы и перемещения не учитываются при проверке;
- **Автоматически** — относительные (по отношению к длине конструктивного элемента) прогибы и перемещения, вычисляемые программно в зависимости от длины элемента; диапазон длин и соответствующие предельные перемещения определены нормативным документом;
- предельное значение выбирается из списка.

Абсолютные значения задаются пользователем или не учитываются, если выбран вариант «**Не ограничены**».

Если заданы одновременно и относительные и абсолютные ограничения, то при вычислении коэффициента использования ограничений принимается во внимание значение, дающее больший по величине коэффициент.

Необходимо отметить, что автоматическая проверка по относительному значению имеет смысл лишь в тех случаях, когда конструктивный элемент не имеет связей в пролете между концевыми узлами.

Учитывая тот факт, что существуют ситуации, когда конструктора интересуют прогибы и перемещения, вызываемые только переменными воздействиями (например, проверка зыбкости конструкции, или же случай, когда перемещения от действия собственного веса парированы строительным подъемом), в программе предусмотрена возможность выполнить проверки как для

всех нагрузок, так и отдельно только для временных. Выбор вида расчета выполняется путем активации маркера в соответствующих строках таблицы и при задании исходных данных для формирования расчетных сочетаний прогибов и перемещений. В любом случае проверки выполняются с учетом расчетных сочетаний прогибов и перемещений, полученных на основе нормативных (характеристических) значений нагрузок.

## Коэффициенты надежности по ответственности

Во всех расчетных режимах требуется задание информации о коэффициенте надежности по ответственности согласно выбранным нормам по надежности (ГОСТ 27751-88, ГОСТ 27751-2014, ДБН В.1.2-14-2009, …).

При расчете используются три коэффициента надежности по ответственности:

- для первого предельного состояния $\gamma_n$;
- для второго предельного состояния;
- для аварийного/особого состояния (используется также при анализе прогрессирующего обрушения и огнестойкости).

Коэффициент $\gamma_n$ может быть выбран из выпадающего списка в соответствии с характеристикой объекта строительства. Например, по ГОСТ 27751-88 значение коэффициента определяется исходя из *повышенной*, *нормальной* или *пониженной* ответственности объекта или вводится пользователем (в нестандартных ситуациях). В ДБН.В.1.2-14.2009 и ДБН.В.1.2-14.2018 $\gamma_n$ определяется в зависимости от класса последствий (СС3, СС2, СС1) и категории ответственности конструкции (А, Б, В).

ДБН В.1.2-14-2009 предусматривает три коэффициента надежности по ответственности (для первого предельного состояния, второго предельного состояния и аварийных ситуаций). Пользователь может задать каждый из этих трех коэффициентов. В ГОСТ 27751-88 предусмотрен только один коэффициент и этот коэффициент используется программой во всех расчетных ситуациях. Если в качестве норм по надежности выбран ГОСТ 27751-2014, то заданный пользователем коэффициент $\gamma_n$ используется при расчетах по первому предельному состоянию. При расчетах по второму предельному состоянию полагается $\gamma_n$=1.0 (чтобы избежать ситуации, при которой нормативные значения оказываются больше расчетных этот коэффициент, принимается не более чем $\gamma_n$ для первого предельного состояния). При анализе особых расчетных ситуаций используется $\gamma_n$=1.0 (см. п. 5.5 СП 296.1325800.2017).

## Тип конструктивного элемента

Предусмотрена возможность назначения конструктивным элементам следующих типов:

- элемент общего вида (или стойка);
- балка (элемент, подверженный одноосному изгибу относительно оси Y);
- элемент пояса фермы;
- элемент решетки фермы;
- опорный раскос фермы;
- опорная стойка фермы.

Программа автоматически на основании выбранного типа будет производить анализ устойчивости в главных или конструктивных осях в соответствии с требованием выбранных норм проектирования.

При назначении типа конструктивного элемента следует помнить, что при экспертизе несущей способности элементов типа ***Балка*** по умолчанию будут учтены только моменты и поперечные силы, а в элементах *фермы* — только продольные силы.

В случае, когда в элементах типа ***Балка*** или ***элемент фермы*** необходимо учитывать весь комплект силовых факторов, следует активировать соответствующий маркер или использовать для них тип ***Элемент общего вида***.

Поскольку разные группы элементов могут иметь различную степень ответственности, то коэффициенты надежности по ответственности назначаются при создании конструктивного элемента и могут отличаться у конструктивных элементов.

После ввода всех данных о конструктивном элементе, включая имя элемента, следует нажать кнопку **Добавить**.

### Копирование параметров конструктивных элементов

Если новый конструктивный элемент имеет все или большинство параметров, совпадающих с ранее созданным элементом, то предусмотрена возможность копирования свойств существующего элемента и присвоение их новому. Для копирования следует выполнить такие действия:

- активировать операцию создания конструктивного элемента;
- выбрать на схеме конечные элементы, составляющие новый конструктивный элемент;
- нажать кнопку **Подтверждение** в инструментальной панели;
- в диалоговом окне **Конструктивный элемент** нажать кнопку **Копирование** и выбрать из появившегося списка элемент, параметры которого копируются;
- уточнить, если это необходимо, параметры нового элемента, включая его имя;
- нажать кнопку **Добавить** (новый элемент);
- выйти из диалогового окна нажатием на кнопку **Применить**.

Операция **Копирование** будет доступна, если в схеме есть ранее созданные конструктивные элементы.

### Контроль конструктивных элементов

Перед включением нового конструктивного элемента в список конструктивных элементов, подлежащих проверке, выполняется контроль корректности назначения. Если в результате контроля обнаружено, что выбранные элементы не соответствуют перечисленным выше требованиям к конечным элементам, составляющим конструктивный элемент, то появляется диалоговое окно **Результат выполнения операции** (рис. 21.2-4).

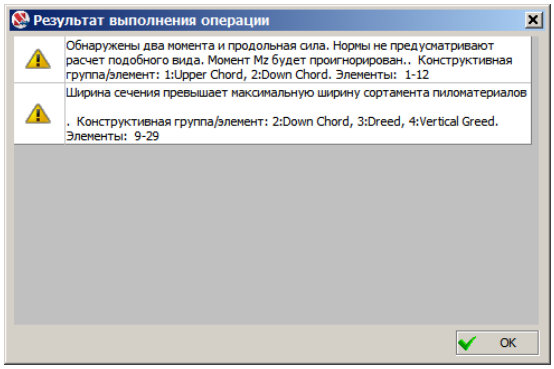



Рис. 21.2-4. *Диалоговое окно* **Результат выполнения операции**

В списке возможных ошибок, приведенном в этом окне, доступными будут те опции, которые указывают на ошибки, допущенные при назначении конструктивного элемента. После закрытия этого окна все сообщения появятся в журнале с указанием номеров элементов схемы, в которых были допущены ошибки. Используя кнопки селекции, установленные в журнале, можно выполнить визуализацию элементов на схеме или их селекцию.

## 21.3. Назначение групп конструктивных элементов



В тех случаях, когда конструктивный элемент содержит только один стержень, есть возможность объединить такие стержни в группы конструктивных элементов. Операции по назначению групп конструктивных элементов и заданию их характеристик аналогичны описанным выше для конструктивных элементов.

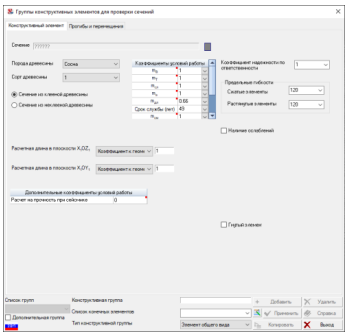


Рис. 21.3-1. *Диалоговое окно* **Группы конструктивных элементов для проверки сечений**

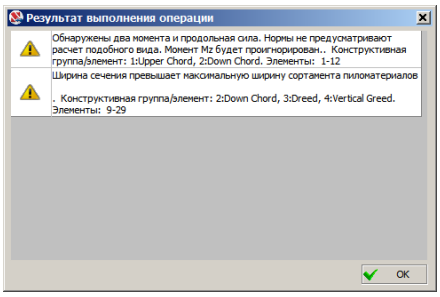



Рис. 21.3-2. *Диалоговое окно* **Результат выполнения операции**

Характеристики групп задаются в диалоговом окне **Группы конструктивных элементов для проверки сечений** (рис. 21.3-1).

При обнаружении ошибок, допущенных при создании группы конструктивных элементов, после нажатия кнопки **Добавить** появляется диалоговое окно с перечнем ошибок (рис. 21.3-2). Правила работы с этим окном такие же, как и правила работы с окном ошибок для конструктивных элементов.

### Учет максимально допустимых перемещений

Учет максимально допустимых вертикальных перемещений для групп конструктивных элементов выполняется по тем же правилам, что и для конструктивных элементов (раздел 21.2). Отличие состоит в том, что максимальное значение перемещений выбирается для каждого конечного элемента, входящего в группу, путем анализа значений перемещений узлов и прогибов.

## 21.4. Корректировка параметров конструктивных элементов и групп конструктивных элементов

Любые из первоначально заданных параметров конструктивных элементов или групп конструктивных элементов (включая состав входящих в них конечных элементов) могут быть изменены в процессе экспертизы и подбора.

Если изменения касаются состава и параметров конструктивного элемента или группы, то после внесения изменений следует нажать кнопку **Применить**, стоящую справа от списка конструктивных элементов или их групп.

Изменения в составе конструктивных элементов или их групп выполняются аналогично заданию. Для этого следует:

- выбрать в списке инструментальной панели **Ввод данных** имя корректируемого элемента или группы;
- нажать кнопку **Выбрать активную группу** —  , после чего конечные элементы, входящие в состав конструктивного элемента или группы, будут выбраны и отмечены красным цветом;
- указанием курсора пометить конечные элементы, исключаемые из состава конструктивной группы (с этих элементов будет снят признак выбора);

- нажать кнопку **Подтверждение** —  инструментальной панели, после чего появится соответствующее диалоговое окно (**Конструктивный элемент** или **Группы конструктивных элементов…**);
- нажать кнопку **Применить** в появившемся диалоговом окне.

Аналогично выполняется и добавление конечных элементов в состав ранее созданного конструктивного элемента.

Для редактирования существующего списка группы используется одноименная кнопка  , нажатие которой приводит к появлению диалогового окна со списком элементов.

В нижней части диалоговых окон **Конструктивный элемент** или **Группа конструктивных элементов** ... (рис. 21.4-1) расположен список *конечных элементов*, в котором перечислены номера элементов, входящих в конструктивный элемент или группу. Этот список можно откорректировать непосредственно в окне. Если при этом на схеме есть выбранные элементы, то с помощью набора операций, который открывается нажатием кнопки  , стоящей справа от списка, можно произвести следующие действия:

- **Создать список элементов по отмеченным элементам**, т. е. фактически заменить, ранее сформированный список элементов, на список из выбранных на схеме элементов;
- **Создать список по данным группы и отмеченным элементам**, т. е. добавить, в ранее сформированный список элементов, выбранные на схеме элементы;
- **Создать список по данным группы, исключив отмеченные элементы**, т. е. исключить из списка, ранее сформированной группы, выбранные на схеме элементы.

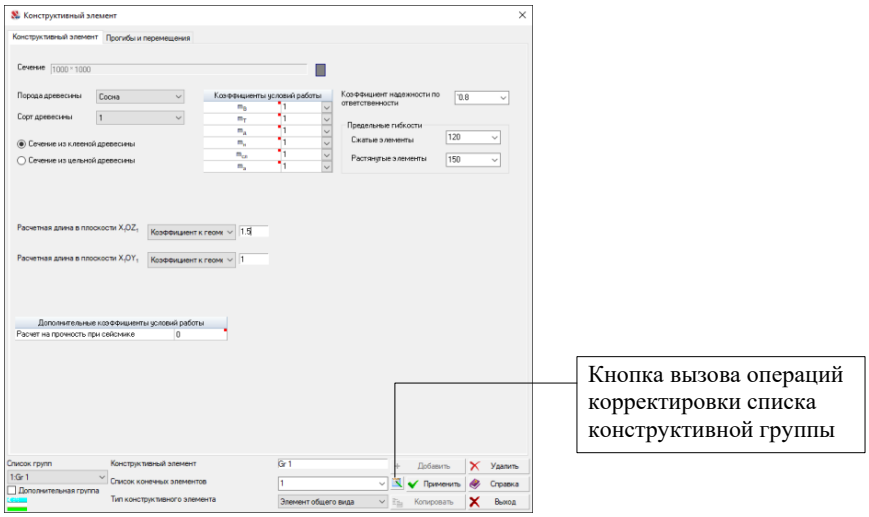



Рис. 21.4-1. *Корректировка списка элементов, входящих в конструктивную группу*

Если после манипуляций со списком элементов (до использования кнопки **Применить**) необходимо вернуться к его начальному состоянию, то следует воспользоваться первой операцией в рассматриваемом списке — **Создать список элементов по данным группы**, после выполнения которой будет восстановлен исходный список группы.

Для удаления конструктивного элемента или группы конструктивных элементов следует выбрать имя из списка инструментальной панели **Ввод данных** и нажать кнопку  . В появившемся диалоговом окне нажать кнопку **Удалить**.

Если удаляется несколько объектов, следует выполнить описанные выше операции для одного объекта, а затем, не выходя из диалогового окна, последовательно выбирать из списка конструктивных элементов (или групп) удаляемые объекты и нажимать кнопку **Удалить**.

## 21.5. Копирование параметров групп конструктивных элементов

Если новая группа конструктивных элементов имеет все или большинство параметров, совпадающих с ранее созданной группой, то предусмотрена возможность копирования свойств существующей группы и присвоение их новой. Для копирования следует выполнить такие действия:

- активировать операцию создания группы конструктивных элементов;
- выбрать на схеме конечные элементы, составляющие новую группу;
- нажать кнопку **Подтверждение** в инструментальной панели;
- в диалоговом окне **Группы конструктивных элементов…** нажать кнопку **Копирование** и выбрать из появившегося списка группу, параметры которой копируются;
- уточнить, если это необходимо, параметры новой группы, включая ее имя;
- нажать кнопку **Добавить** (новую группу);
- выйти из диалогового окна нажатием на кнопку **Применить**.

Операция **Копирование** будет доступна, если в схеме есть ранее созданные группы конструктивных элементов.

## 21.6. Основные и дополнительные группы

Если некоторый конечный элемент одновременно принадлежит нескольким конструктивным элементам (или группам конструктивных элементов), то это порождает многочисленные проблемы и вопросы. Например, какие результаты следует использовать при назначении жесткостей по результатам подбора? На основании каких данных вычислять величину $K_{max}$ после проведения экспертизы при отображении коэффициента использования ограничений для всей схемы, а не для отдельного конструктивного элемента?

В то же время, в некоторых случаях удобно иметь возможность создать несколько конструктивных элементов (или групп), которые имеют один и тот же набор конечных элементов, но различаются параметрами (например, сортом древесины или коэффициентами условий работы). Это позволяет произвести сравнение результатов, используя многооконный режим, и принять обоснованное решение.

Для реализации такой возможности предусмотрено создание конструктивных групп, имеющих признак **Дополнительная группа** (рис. 21.6-1). Этот признак присваивается при создании группы и позволяет работать с набором конструктивных групп, имеющих совпадающие все или несколько конечных элементов. При использовании основных и дополнительных групп имеются следующие ограничения:

- конечный элемент не может одновременно принадлежать двум основным группам;
- дополнительные группы не используются при определении $K_{max}$ для всей схемы;
- если конечный элемент одновременно принадлежит основной и дополнительной группе/ группам, то в информации об элементе при нажатии кнопок **Дерево**. **Факторы**, **Сопротивление сечений**, ... появляется меню с перечнем групп, из которого и выбирается группа для отображения результатов;
- дополнительные группы не используются при расчете прогрессирующего обрушения.

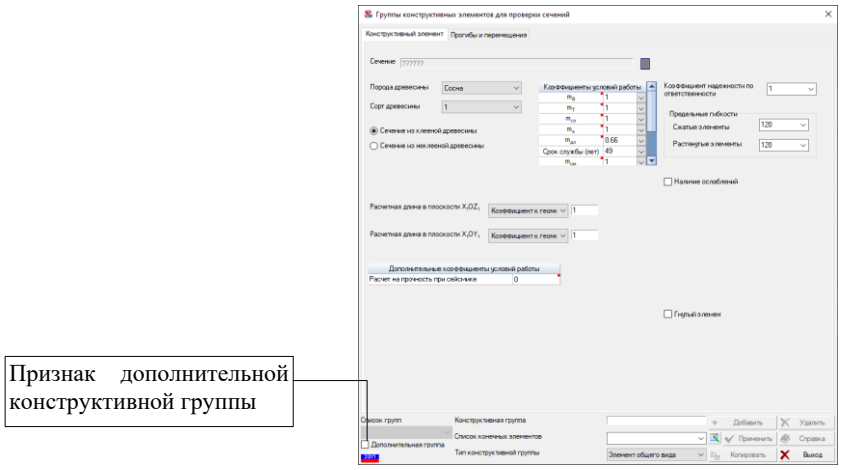



Рис. 21.6-1. *Диалоговое окно* **Группы конструктивных элементов для проверки сечений** *(дополнительная группа)*

В списках конструктивных групп в инструментальных панелях и диалоговых окнах дополнительные группы отмечаются зеленым фоном пиктограмм. При создании основных и дополнительных групп желательно обеспечивать уникальность их имен.

## 21.7. Выбор элементов группы



Операция используется для выбора элементов активной конструктивной группы или конструктивного элемента. По умолчанию для визуализации выбранных элементов используется красный цвет. Смена цвета выполняется в меню ***Настройки*** в разделе **Настройка цветовой схемы** (страница **Схема**, пункт **Выбор узлов и элементов**).

## 21.8. Визуализация активной группы



В тех случаях, когда не предполагается выполнение операций с выбранной конструктивной группой, а необходимо только выделить ее на схеме, используется операция визуализации конструктивной группы. Группа, выбранная в списке конструктивных групп инструментальной панели **Ввод данных**, будет «подсвечена» на схеме фиолетовым цветом.

## 21.9. Управление группами конструктивных элементов



Операция  используется для управления атрибутами конструктивных групп и позволяет выполнить следующие действия:

- переименование группы;
- сортировка групп по заданному признаку;
- удаление группы;
- изменение места выбранной группы в списке групп.

Активация операции приводит к появлению одноименного диалогового окна (рис. 21.9-1), со списком конструктивных групп. Графы таблицы конструктивных групп включают:

- текущий номер конструктивной группы;
- **№** — номер группы в порядке создания;
- **Тип** — пиктограмма типа конструктивной группы (  — конструктивный элемент,  — группа конструктивных элементов). Если группа является дополнительной, то соответствующая икона имеет зеленый фон;

- **Имя** — имя конструктивной группы;
- **Количество элементов** в группе.

Для переименования группы следует установить курсор на имя нужной группы и дважды нажать левую кнопку мыши. Строка становится доступной для редактирования.

Характеристика группы, относительно которой выполняется сортировка, выбирается из списка **Сортировать по**. Предусмотрены следующие виды сортировок:

- по номеру (в очередности создания группы — при нажатой кнопке **Min/Max**; и наоборот — при нажатой кнопке **Max/Min**);
- по типу группы (при нажатой кнопке **Min/Max** первыми в списке будут конструктивные элементы, а затем группы конструктивных элементов и наоборот — при нажатой кнопке **Max/Min**);
- по имени группы (в алфавитном порядке при нажатой кнопке **Min/Max** и наоборот — при нажатой кнопке **Max/Min**);
- по количеству элементов в группе (по возрастанию количества элементов в списке конструктивных групп при нажатой кнопке **Min/Max** и наоборот — при нажатой кнопке **Max/Min**).

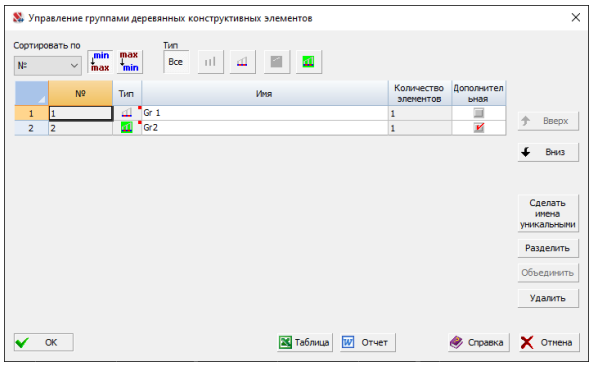



Рис. 21.9-1. *Диалоговое окно*
**Управление группами деревянных конструктивных элементов**

Для изменения положения в списке одной или нескольких конструктивных групп необходимо отметить эти группы и переместить их по списку на нужное количество позиций нажатием на кнопки **Вверх** и **Вниз**.

Для удаления конструктивных групп их следует выделить в таблице, для чего указать курсором на текущий номер группы и нажать левую кнопку мыши. После чего нажать кнопку **Удалить**. Если удаляемые группы идут в списке подряд, то для их выделения следует установить курсор на первую в списке группу, нажать левую кнопку мыши и, не отжимая кнопку, провести курсор по номерам удаляемых групп.

Если при вводе данных пользователь создал несколько групп с одинаковыми именами, то кнопка **Сделать имена уникальными** позволяет автоматически переименовать (добавляя к имени суффикс № XXX) группы и получить неповторяющиеся имена.

Для объединения групп конструктивных элементов следует выделить эти группы в списке при нажатой кнопке **Ctrl** на клавиатуре, после чего нажать кнопку **Объединить**. Операция будет доступна только в случае совпадения всех параметров объединяемых групп конструктивных элементов. После активации операции появится диалоговое окно, в котором вводится имя объединенной группы.

Кнопка **Разделить** предназначена для автоматизации процесса коррекции ошибок в данных о конструктивных элементах и автоматического создания конструктивных элементов и групп конструктивных элементов. При нажатии этой кнопки для каждой выбранной группы производятся следующие действия.

- Из списка элементов удаляются все нестержневые элементы.
- Из списка элементов удаляются все элементы, которые не могут быть интерпретированы, как деревянные.

- Для оставшихся элементов создаются конструктивные элементы путем объединения стержней с одинаковой жесткостью, лежащие на одной прямой и последовательно примыкающие друг к другу. Кроме того, контролируется отсутствие шарниров в промежуточных узлах. Допускается наличие жестких вставок при условии, что у всех элементов эти вставки одинаковы.
- Все прочие параметры (материал, расчетные длины, ...) наследуются из свойств первоначальной группы.
- Для всех оставшихся после описанных выше действий конечных элементов формируются группы конструктивных элементов. При этом в каждую такую группу попадают конечные элементы с одинаковыми типами жесткостей.

Кнопки, расположенные в верхней части диалогового окна позволяют отфильтровать группы, которые следует отображать (например, заказать отображение только дополнительных деревянных конструктивных элементов).

Все назначения, сделанные в диалоговом окне, будут зафиксированы и выполнены после выхода из окна по кнопке **OK**. При этом положение конструктивных групп в списке инструментальной панели будут соответствовать их положению в списке диалогового окна.

## 21.10. Информация о группах деревянных конструктивных элементов

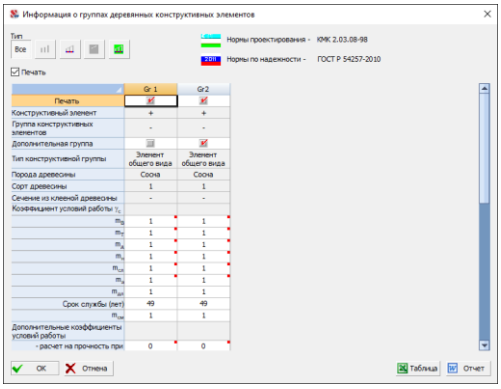



Рис. 21.10-1. *Диалоговое окно*
**Информация о группах деревянных конструктивных элементов**

Данная операция позволяет получить в диалоговом окне (рис. 21.10-1) таблицу с данными обо всех группах конструктивных элементов. Кнопка **Отчет** активирует создание отчетного документа. Кнопки, расположенные в верхней части диалогового окна, позволяют отфильтровать группы, которые следует отображать (например, заказать отображение только дополнительных групп деревянных конструктивных элементов).

Маркеры в строке **Печать** позволяют отметить только те группы, информация о которых должна быть помещена в отчетный документ.

## 21.11. Смена норм проектирования




Операция позволяет изменить нормы проектирования деревянных конструкций и нормы надежности. В диалоговом окне (рис. 21.11-1) из выпадающих списков следует выбрать нужные нормы и нажать кнопку **OK**. При смене норм следует помнить, что нормы, по которым выбирались расчетные сочетания усилий, и нормы проектирования должны корреспондироваться.

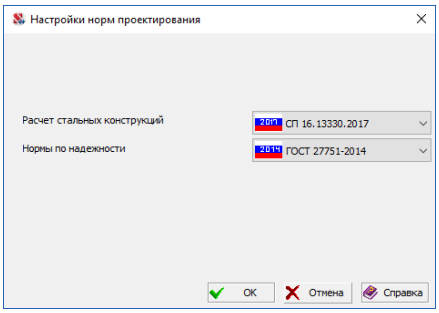



Рис. 21.11-1. *Диалоговое окно* **Настройки норм проектирования**

## 21.12.Экспертиза сечений






Рис. 21.12-1. *Инструментальная панель для расчета несущей способности элементов деревянных конструкций и анализа результатов*

Инструментальная панель для экспертизы и анализа результатов (рис. 21.12-1) включает кнопки для вызова следующих операций:

 — активация расчета (экспертиза сечений);

 — формирование отчета;

 — визуализация результатов проверки на схеме (3-х цветная шкала);

 — визуализация результатов проверки на схеме (полноцветная шкала);

 — визуализация результатов по выбранному конструктивному элементу;

 — состав группы конструктивных элементов;

 — сброс выбранной группы;

 — отображение расчетной схемы;

 — режим визуализации активной группы;

 — экстремальные значения факторов;

 — индикация норм проектирования.

Экспертиза несущей способности конструктивных элементов и/или групп конструктивных элементов выполняется нажатием кнопки **Расчет** —  . Данная кнопка содержит стрелку дополнительных возможностей, которая позволяет, кроме экспертизы всех конструктивных групп, выполнить расчет только для тех групп, в которые вносились изменения или выбранных пользователем групп. Независимо от того, вносились ли изменения во все конструктивные группы или только в часть из них, контроль исходных данных выполняется для всех групп и, соответственно, диагностические сообщения будут выданы для всех групп, а не только для тех, которые пересчитывались.

Проверка выполняется для всех сечений конечных элементов, входящих в конструктивный элемент или группу конструктивных элементов. Результатом экспертизы является наибольшее значение каждого фактора, определяющего несущую способность элемента.

В таблицах ниже приведены списки проверок для различных типов конструктивных элементов.

**Проверки сечений элементов общего вида (стойки)**

| Проверка | Ссылка на СНиП II-25-80, КМК 2.03.08.98 | Ссылка на СП 64.13330.2011 | Ссылка на СП 64.13330.2017 |
|---|---|---|---|
| Гибкость элемента в плоскости XoY | п. 4.4 | п. 6.4 | п. 7.4 |
| Гибкость элемента в плоскости XoZ | п. 4.4 | п. 6.4 | п. 7.4 |
| Прочность элемента при действии растягивающей продольной силы | п. 4.1 | п. 6.1 | п. 7.1 |
| Прочность элемента при действии сжимающей продольной силы | п. 4.2 | п. 6.2 | п. 7.2 |
| Устойчивость в плоскости XoZ при действии продольной силы | п. 4.2 | п. 6.2 | п. 7.2 |
| Устойчивость в плоскости XoY при действии продольной силы | п. 4.2 | п. 6.2 | п. 7.2 |
| Прочность элемента при действии изгибающего момента My | п. 4.9 | п. 6.9 | п. 7.9 |
| Прочность элемента при действии изгибающего момента Mz | п. 4.9 | п. 6.9 | п. 7.9 |
| Прочность при совместном действии My и Mz | п. 4.12 | п. 6.12 | п. 7.12 |
| Прочность при совместном действии продольной силы и изгибающего момента Mz | пп. 4.16, 4.17 | пп. 6.16, 6.17 | пп. 7.16, 7.17 |
| Прочность при совместном действии продольной силы и изгибающего момента My | пп. 4.16, 4.17 | пп. 6.16, 6.17 | пп. 7.16, 7.17 |
| Прочность при действии поперечной силы Qz | п. 4.10 | п. 6.10 | п. 7.10 |
| Прочность при действии поперечной силы Qy | п. 4.10 | п. 6.10 | п. 7.10 |
| Устойчивость плоской формы деформирования | пп. 4.14, 4.15, 4.18 | пп. 6.14, 6.15, 6.20 | пп. 7.14, 7.15, 7.20 |

**Проверки сечений элементов балки**

| Проверка | Ссылка на СНиП II-25-80, КМК 2.03.08.98 | Ссылка на СП 64.13330.2011 | Ссылка на СП 64.13330.2017 |
|---|---|---|---|
| Прочность элемента при действии изгибающего момента $M_y$ | п. 4.9 | п. 6.9 | п. 7.9 |
| Прочность при действии поперечной силы Q | п. 4.10 | п. 6.10 | п. 7.10 |
| Устойчивость плоской формы деформирования | пп. 4.14, 4.15, 4.18 | пп. 6.14, 6.15, 6.18 | пп. 7.14, 7.15, 7.18 |
| Прогиб | п. 4.33 | п. 6.35 | п. 7.35 |

**Проверки сечений элементов пояса фермы**

| Проверка | Ссылка на EN 1995 | Ссылка на СНиП II-25-80, КМК 2.03.08.98 | Ссылка на СП 64.13330.2011 | Ссылка на СП 64.13330.2017 |
|---|---|---|---|---|
| Гибкость элемента в плоскости XoY | | п. 4.4 | п. 6.4 | п. 7.4 |
| Гибкость элемента в плоскости XoZ | | п. 4.4 | п. 6.4 | п. 7.4 |
| Прочность элемента при действии растягивающей продольной силы | П. 6.1.2 | п. 4.1 | п. 6.1 | п. 7.1 |
| Прочность элемента при действии сжимающей продольной силы | П. 6.1.4 | п. 4.2 | п. 6.2 | п. 7.2 |
| Прочность по скалыванию при действии изгибающего момента My | П. 6.1.7 | | | |
| Прочность при совместном действии My и Mz | П. 6.1.6 (Ф. 6.11) | | | |
| Прочность при совместном действии My и Mz | | | | |
| Устойчивость в плоскости XoZ при действии продольной силы | | п. 4.2 | п. 6.2 | п. 7.2 |
| Устойчивость в плоскости XoY при действии продольной силы | | п. 4.2 | п. 6.2 | п. 7.2 |
| Прочность элемента при действии изгибающего момента My | | п. 4.9 | п. 6.9 | п. 7.9 |
| Прочность при совместном действии растягивающей продольной силы и изгибающего момента My | | п. 4.16 | п. 6.16 | п. 7.16 |
| Прочность при совместном действии сжимающей продольной силы и изгибающего момента My | | пп. 4.16, 4.17 | п. 6.17 | п. 7.17 |
| Прочность при действии поперечной силы Qz | | п. 4.10 | п. 6.10 | п. 7.10 |
| Устойчивость плоской формы деформирования | | пп. 4.14, 4.15, 4.18 | п. 6.20 | п. 7.20 |

Для **элементов ферм** предполагается, что вертикальной является именно плоскость фермы. Гибкость растянутых элементов фермы из плоскости фермы не проверяется. Соответственно, раскрепление нижнего (растянутого) пояса из плоскости фермы не влияет на результат проверки его гибкости. В том случае, если пользователю необходимо выполнить проверку гибкости растянутых элементов из плоскости фермы (для горизонтальных ферм, или для ферм, расположенных под углом к горизонту), можно использовать тип **Элемент общего вида**. При проверочном расчете такого растянутого элемента проверке подлежат обе его гибкости, поскольку само понятие вертикальной плоскости в данном режиме отсутствует.

### Особенности реализации

Формально при внецентренном сжатии (например, при действии $N$, $M_y$, $M_z$) в нормах нет требования проверки устойчивости при центральном сжатии. Однако без проверки того, что устойчивость при центральном сжатии обеспечена, другие проверки могут потерять смысл. Например, величина предельной гибкости типа 180-60α может стать отрицательной (величина α совпадает с фактором по устойчивости при центральном сжатии). Поэтому факторы по устойчивости при центральном сжатии вычисляются всегда.

## 21.13.О сейсмических и особых воздействиях

Если в расчетное сочетание вошло сейсмическое воздействие, то в комплексе **SCAD** автоматически учитывается требование выбранного нормативного документа относительно ввода дополнительного коэффициента условий работы. Так, при расчете на прочность и устойчивость с учетом сейсмической нагрузки для СП 14.13330.... «Строительство в сейсмических районах» вводится коэффициент $m_{tr}$.

## 21.14.Отображение результатов

Результаты проверки несущей способности могут отображаться на схеме для всех конструктивных элементов, групп конструктивных элементов или групп унификации, а также для каждого конструктивного элемента или группы элементов в отдельности.

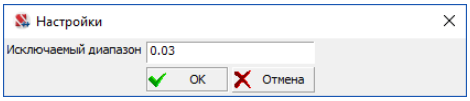



Рис. 21.14-1. *Диалоговое окно* **Настройки**

При использовании операции отображения, которая активируется кнопкой **Отображение результатов проверки на схеме (3-х цветная шкала)** — , конструктивные элементы отображаются на схеме тремя цветами — зеленым, если несущая способность достаточна, красным — в противном случае или желтым, если несущая способность находится вблизи критического значения (фактор близок к 1,0). Критический диапазон задается путем настройки цветовой шкалы (кнопка в окне шкалы). Например, если в диалоге (рис. 21.14-1) задать величину 0,03, то все элементы с величиной фактора меньше 0.97 будут окрашены в зеленый цвет, при факторе больше 1,03 — в красный, а в том случае, когда фактор находится в диапазоне [0,97;1,03] — будет использован желтый цвет.

При использовании режима отображения, который активируется кнопкой **Отображение результатов проверки на схеме (полноцветная шкала) —** появится обычная цветовая шкала с настраиваемым количеством цветов.

Если в выпадающем списке не выбрана ни одна группа конструктивных элементов, то производится визуализация критического фактора $\mathbf{K_{max}}$. Если выбрана конкретная группа, то в списке факторов появится полный перечень произведенных проверок и на схеме можно отобразить и результаты проверки по каждому из факторов, определяющих несущую способность объектов проверки (например, прочности или устойчивости). Для предварительной оценки (эскизное проектирование), кроме коэффициента использования ограничения $\mathbf{K_{max}}$, предусмотрена также визуализация цветовой шкалы коэффициента использования ограничения без учета факторов по гибкостям и факторов по местной устойчивости. Значения выбранного фактора можно вывести на схему, воспользовавшись кнопкой фильтров **Оцифровка** — .

Для визуализации результатов по каждому конструктивному элементу следует выбрать имя объекта в соответствующем списке и нажать кнопку **Выборочная визуализация результатов**  . В результате открывается диалоговое окно **Диаграмма факторов** (рис. 21.14-2а), в котором по каждому фактору проверки выводится коэффициент использования. Красным цветом на диаграмме будут отмечены факторы, у которых коэффициент использования несущей способности превышает единицу. Маркер **Показать усилия** позволяет получить альтернативное представление информации, при котором будут показаны усилия/напряжения в элементе (рис. 21.14-2,*б*).



*а*) *б*)

Рис. 21.14-2. *Диалоговое окно*
**Диаграмма факторов**

Для анализа несущей способности каждого элемента конструктивной группы используется диалоговое окно **Элементы группы**, показанное на рис. 21.14-3, которое вызывается нажатием кнопки **Состав группы конструктивных элементов** —  .

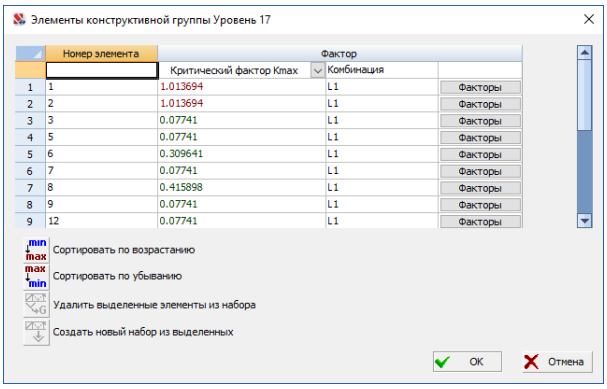



Рис. 21.14-3. *Диалоговое окно*
**Элементы конструктивной группы**

Для вызова окна следует выбрать в списке инструментальной панели имя исследуемой группы и нажать указанную кнопку. Главным информационным элементом окна является таблица, в которой записаны номера элементов, входящих в выбранную группу, значения коэффициентов использования по фактору, установленному в первой строке таблицы, а также кнопки **Факторы**, с помощью которых можно получить коэффициенты использования несущей способности для отдельного элемента.

С помощью кнопок, расположенных под таблицей, выполняются следующие действия:

- сортировка элементов (по возрастанию  или убыванию  ) выбранного фактора;
-  — удаление отмеченных в таблице элементов из состава группы;
-  — создание нового набора из маркированных элементов — создается новая группа элементов, в которую входят элементы с активными маркерами (эти элементы из текущей группы удаляются).

Дополнительные возможности для анализа несущей способности элементов деревянных конструкций, входящих в состав конструктивных групп, предоставляют операции

**Древесина. Факторы** и **Древесина. Сопротивление сечений**, которые вызываются из диалогового окна **Информация об элементе** (кнопка  на панели фильтров). Эти операции реализованы по тем же правилам, что и соответствующие операции программы **Декор**[1].

**Древесина. Факторы** — позволяет получить диаграмму факторов для выбранного элемента (рис. 21.14-4) по результатам экспертизы сечений. Маркер **Показать усилия** позволяет получить альтернативное представление информации, при котором будут показаны усилия/напряжения в элементе (рис. 21.14-5).

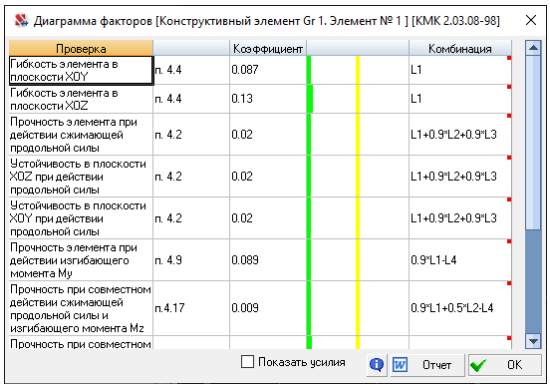



Рис. 21.14-4. *Диалоговое окно* **Диаграмма факторов**

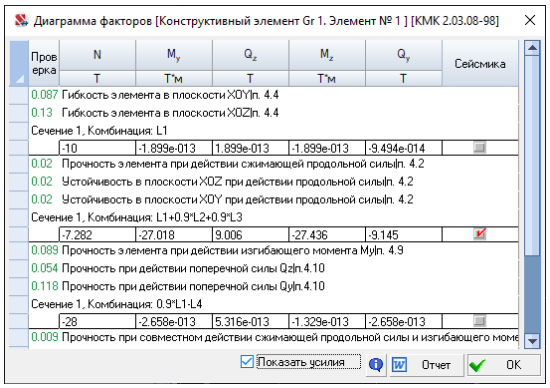



Рис. 21.14-5. *Диалоговое окно* **Диаграмма факторов** (альтернативное представление)

**Сопротивление сечений** — позволяет провести расширенный анализ несущей способности сечений. Исходные данные для выполнения экспертизы включают информацию о конечном элементе (длина, сечение), а также параметры конструктивной группы, в которую входит анализируемый элемент. Если стержневой элемент является частью конструктивного элемента, то в качестве длины будет передана длина конструктивного элемента. Усилия на одноименной странице соответствуют РСУ этого элемента. В процессе экспертизы допускается изменение различных параметров, например, коэффициента условий работы, вида древесины и др., что позволяет проанализировать их влияние на несущую способность элемента. Если конструктивная группа, в состав которой входит элемент, определена как элемент фермы, то нажатие кнопки **Сопротивление сечений** (рис. 21.14-4) приведет к появлению окна с параметрами расчета элементов ферм (рис. 21.14-5).

## 21.15.Формирование отчета



По результатам проверки можно сформировать отчет. Он формируется в формате **RTF** и автоматически загружается в ассоциированное с этим форматом приложение (например, MS Word или WordPad). Перед формированием отчета появляется диалоговое окно (рис. 21.15-1), в котором следует выбрать конструктивные элементы и/или группы конструктивных элементов, информация по которым должна попасть в отчет.

В окне предусмотрены следующие опции управления выводом:

- **Для всех групп и конструктивных элементов** — в отчет попадут все конструктивные группы из списка;
- **Только для указанных групп и конструктивных элементов** — в отчете будет информация только об отмеченных в списке группах;

[1] В.С. Карпиловский, Э.З. Криксунов, А.А. Маляренко, М.А. Микитаренко, А.В. Перельмутер, М.А. Перельмутер, В.Г. Федоровский, В.В. Юрченко «SCAD Office. Реализация СНиП в проектирующих программах» — М.: СКАД СОФТ, 2014 — 480с.

- **Для указанных элементов** — в этом случае в поле ввода нужно ввести номера конечных элементов, для которых следует сформировать отчет.

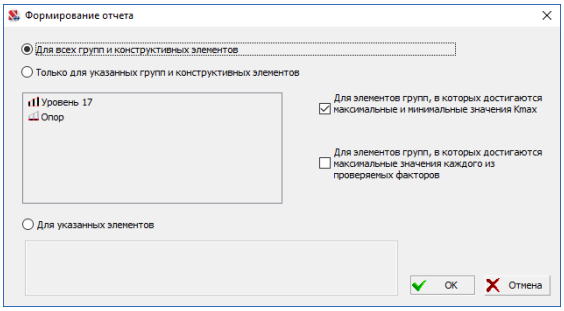



Рис. 21.15-1. *Диалоговое окно*
**Формирование отчета**

Кроме того, маркеры **Для элементов групп, в которых достигаются максимальные и минимальные значения $K_{max}$** и **Для элементов групп, в которых достигаются максимальные значения каждого из проверяемых факторов** позволяют получить отчет только для элементов, в которых факторы достигают максимума.

## 21.16.Экстремальные значения факторов

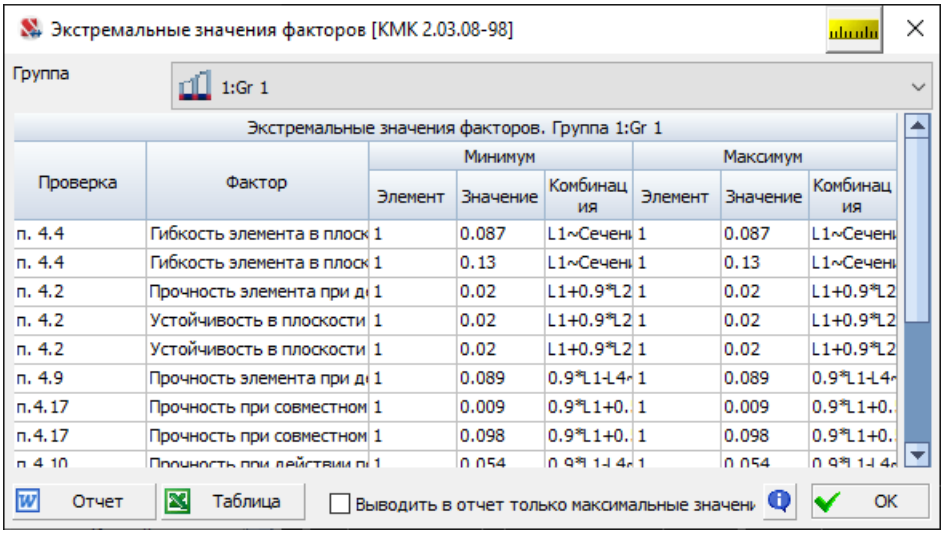



Рис. 21.16-1. *Диалоговое окно*
**Экстремальные значения факторов**

Данная операция позволяет для выбранной группы конструктивных элементов или конструктивного элемента сформировать таблицу (рис. 21.16-1), включающую следующую информацию:

- список факторов;
- минимальное и максимальное значение каждого фактора;
- номера конечных элементов, на которых реализовались значения минимума и максимума.

Выбор группы или конструктивного элемента выполняется из списка, расположенного в верхней части диалогового окна. Кнопки **Отчет** и **Таблица** активируют создание отчетных документов в соответствующих форматах для выбранной группы. Специальный маркер позволяет получить отчет, в котором содержатся только максимальные значения факторов.

# 22. Экспертиза огнестойкости элементов конструкций

Под огнестойкостью понимают способность конструктивных элементов зданий сохранять прочность в условиях пожара. Огнестойкость здания зависит от пределов огнестойкости его основных конструктивных частей. При этом, наряду с механическими воздействиями, следует учитывать изменение теплотехнических и механических свойств стали, бетона и арматуры под влиянием нагрева конструкции от пожара.

## 22.1. Огнестойкость элементов стальных конструкций

В программе **SCAD** реализован анализ огнестойкости отдельных незащищенных элементов стальных конструкций. Проверка производится методом критической температуры по ДСТУ-Н Б В.2.6-211:2016 (рекомендации этого стандарта аналогичны EN 1993-1-2:2005). В методе предполагается, что при нагреве от пожара температура стали равномерно распределена по конструкции и ее критическое значение определяется тем запасом прочности, который имеет рассматриваемый элемент. Указанный запас прочности характеризуется коэффициентом использования несущей способности $\mu_0$, физический смысл которого соответствует коэффициенту $K_{max}$ . С учетом $\mu_0$ критическая температура вычисляется по формуле

$$\theta_{a,cr} = 30{,}19 \ln\left(\frac{1}{0{,}967\mu_0^{3{,}833}} - 1\right) + 482.$$

Программа определяет значение коэффициента использования несущей способности $K_{max}$ от комбинаций нагрузок, которые включают только значения постоянных и длительно действующих нагрузок на момент $t = 0$. При расчете используются нормативные значения прочности материала (см., например, СП 296.1325800.2017).

Расчет огнестойкости реализован для следующих типов сечений:

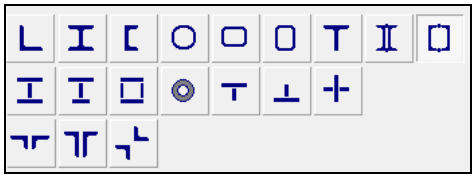


Рис. 22.1-1 *Сечения элементов стальных конструкций, для которых реализован расчет огнестойкости*

Учитываются лишь нормативные постоянные и длительно действующие нагрузки.

При расчетах по Еврокоду используются комбинации нагрузок, которые включают только значения постоянных и длительно действующих нагрузок на момент $t = 0$ (квазипостоянная комбинация).

Результатами расчета являются критическая температура, время достижения этой температуры, а также графики изменений температуры воздуха и температуры стали.

Расчет выполняется на один из четырех вариантов нагрева конструкции (рис. 22.1-2):

- стандартный пожар;
- углеводородный пожар;
- внешний пожар;
- тлеющий пожар.

Предусмотрен анализ вариантов по типу огневого воздействия:

- нагрев с четырех сторон для всех поперечных сечений;
- нагрев с трех сторон для всех сечений кроме сечений из уголков и для трубчатого сечения.

Возрастание температуры стали при нагреве рассчитывается с учетом изменения теплопроводности и удельной теплоемкости стали (рис. 22.1-3).

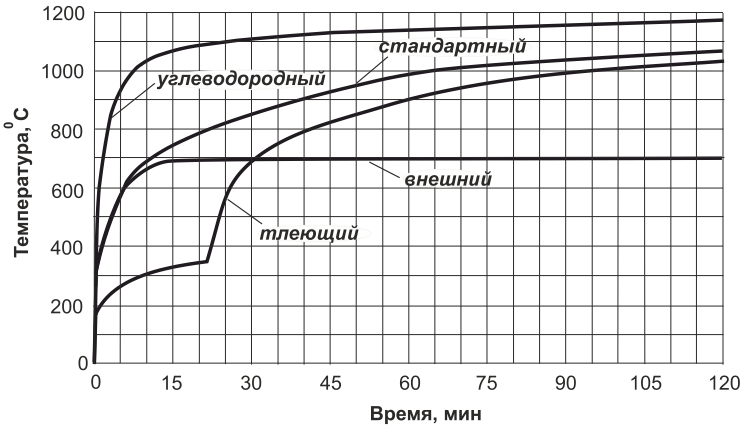



Рис. 22.1-2. *Температурные кривые*

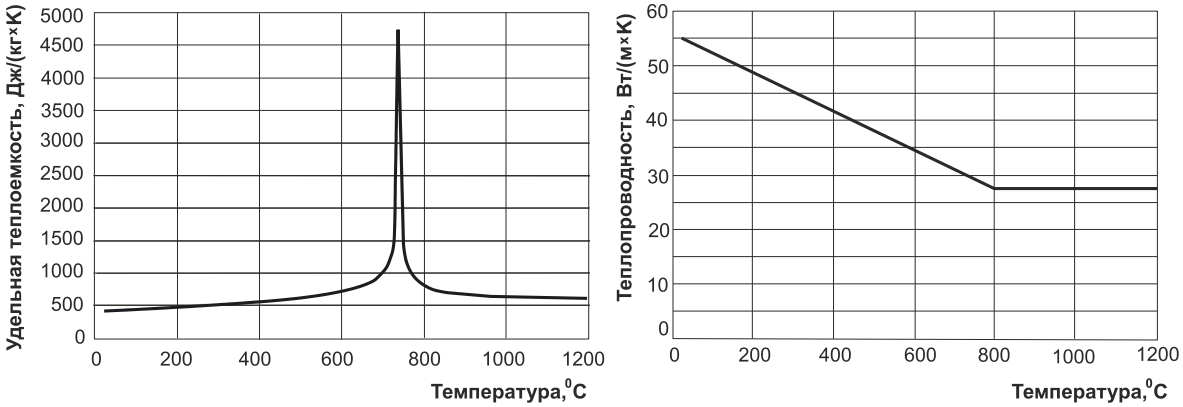



Рис. 22.1-3. *Изменение теплотехнических свойств стали*

## 22.2. Огнестойкость элементов железобетонных конструкций

В программе **SCAD** реализован анализ огнестойкости отдельных незащищенных элементов железобетонных конструкций.

Для оценки огнестойкости выполняются следующие расчеты:

- теплотехнический расчет — анализ нагрева конструкции;
- прочностной расчет — анализ механического поведения конструкции.

Огнестойкость связана с необходимостью обеспечения необходимого запаса прочности конструкции в течение определенного времени.

### Теплотехнический расчет

Расчет направлен на определение закона распределения температуры в расчетном сечении, когда температурное поле $T(y,z,t)$ определяется нелинейным нестационарным уравнением теплопроводности

$$\frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial z}\right)=c\rho\frac{\partial T}{\partial t},$$

где $\lambda(y,z,T)$ — коэффициент теплопроводности, $c(y,z,T)$ — удельная теплоемкость, $\rho$ — плотность материала. Зависимость этих параметров от температуры представлена в нормативных документах.

Решение представленного выше уравнения теплопроводности выполняется для граничных условий, описывающих теплоотдачу от горячего воздуха

$$\frac{\partial T(t)}{\partial n} = \alpha\left[\theta(t) - T(t)\right].$$

А нагрев воздуха определяется температурой пожара $\theta(t)$, которая описывается определенным законом изменения во времени.

Начальные условия, учитываемые при решении уравнения теплопроводности, описывают постоянное по всей области сечения поле температур $T(y,z,0) = 20°C$.

## Прочностной расчет

Проверка прочности сечения, выполняемая при оценке огнестойкости, отличается от обычного случая тем, что здесь:

- рассматривается особое (аварийное) предельное состояние и поэтому кроме огневого воздействия учитываются лишь нормативные постоянные и длительно действующие нагрузки;
- учитывается изменение физико-механических параметров материалов (бетона и арматуры), вызванное нагревом и, поскольку поле температур неравномерное, эти характеристики определяются для каждой расчетной точки поперечного сечения независимо.

Программа определяет значение коэффициента использования несущей способности $K_{max}$ от комбинации нагрузок, которая включает только значения постоянных и длительно действующих нагрузок на момент $t = 0$. При расчете используются нормативные значения прочности материала (см., например, СП 296.1325800.2017).

Расчетные сопротивления бетона $R_{bt}$ и арматуры $R_{st}$, а также их модули упругости $E_{bt}$ и $E_{st}$ принимаются с учетом значений $R_b$, $R_s$, $E_b$ и $E_s$ для заданных классов бетона и арматуры, но корректируются с учетом температуры нагрева $T$,°C по формулам

$$R_{bt} = R_b\gamma_{bt}; \quad R_{st} = R_s\gamma_{st}; \quad E_{bt} = E_b\beta_b; \quad E_{st} = E_s\beta_s.$$

Кроме того, от температуры зависит и значение критических деформаций арматуры $\varepsilon_{s2}$ и бетона $\varepsilon_{b2}$, поскольку с изменением температуры меняется зависимость «напряжение-деформация».

В результате расчета определяются следующие факторы:

- Деформация бетона в нормальном сечении;
- Деформация арматуры в нормальном сечении;
- Прочность по полосе между наклонными сечениями при действии поперечной силы;
- Прочность наклонного сечения при действии поперечной силы.

**Особенности реализации**

К сожалению СТО 36554501-006-2006 (и Пособие к этому СТО) содержит много ошибок и опечаток. Ниже перечислены некоторые корректировки, которые были внесены при реализации расчета огнестойкости.

- В п. 6.3 СТО 36554501-006-2006 в формуле для определения коэффициента теплоемкости указан знак «-», что очевидно является опечаткой, т.к., например, в МДС 21-2.2000 и других источниках указан знак «+».
- В п. 9.3 СТО 36554501-006-2006 неверно указана размерность коэффициента пропорциональности (Вт м$^{3/2}$/кг). Правильной является размерность Вт м$^{5/2}$/кг (см. *Рекомендации по защите бетонных и железобетонных конструкций от хрупкого разрушения*, М., Стройиздат, 1979).
- Согласно п. 5.11 СТО 36554501-006-2006 величина $\varepsilon_{s2}$=0,0025 при $t_s$ = 20 - 200 °C. Очевидно, что это опечатка и следует использовать $\varepsilon_{s2}$=0,025 (см. п. 6.2.14 СП 63.13330), поскольку при низких температурах должно быть соответствие между обычным расчетом и расчетом с учетом действия пожара. По аналогичным соображениям вместо приведенной в п. 5.7 СТО 36554501-006-2006 величины $\varepsilon_{b2}$=0,00035 (или $\varepsilon_{b2}$=0,000035 из п. 8.2 Пособия к СТО 36554501-006-2006) используется $\varepsilon_{b2}$=0,0035 (см. п. 6.1.20 СП 63.13330).

Перечисленные выше ошибки исправлены в СП 468.1325800.2019, но в этом СП отсутствуют рекомендации по расчету огнестойкости на основании нелинейной деформационной модели, позволяющей производить анализ в общем случае. Поэтому в программе теплотехнический расчет производится согласно СП 468.1325800.2019, а анализ прочности — согласно рекомендациям СТО 36554501-006-2006.

## 22.3. Результаты анализа огнестойкости

Для унифицированного представления результатов расчета огнестойкости как стальных, так и железобетонных конструкций используется следующий подход. Для любого элемента результат — это фактор, который равен

- для железобетонных элементов — максимальному из перечисленных выше факторов на момент времени, заданному в параметрах расчета;
- для стальных элементов — отношение заданного пользователем (в параметрах расчета) требуемого предела огнестойкости к времени достижения критической температуры.

## 22.4. Подготовка исходных данных, расчет и анализ результатов

Постпроцессор **Огнестойкость** загружается из раздела **Постпроцессоры** инструментальной панели. Экспертиза выполняется для стержневых и пластинчатых элементов. Обязательным условием для ее выполнения является наличие в элементах элементов железобетонных конструкций заданного армирования (арматура может быть задана «вручную» или получена в результате расчета), а для элементов стальных конструкций — принадлежность к одной из групп конструктивных элементов.

Для выполнения экспертизы рекомендуется следующий порядок действий:

- сформировать группы элементов, объединяя в одну группу стержни или пластины с одинаковыми типами огневого воздействия;
- в диалоговом окне **Назначение параметров расчета огнестойкости** из выпадающего списка **Температурная кривая** выбрать вид пожара и задать требуемый предел огнестойкости элементов конструкции;
- выполнить расчет.

Результаты расчета представлены в виде коэффициентов использования ограничений для всех элементов групп и отображаются с помощью многоцветной или трехцветной цветовой шкалы.

### Инструментальная панель Огнестойкость




Рис. 22.4-1. *Инструментальная панель* **Огнестойкость**

Элементы управления инструментальной панели (рис. 22.4-1) включают следующие кнопки:

 — выполнение расчета;

 — формирование отчета;

 — назначение параметров расчета огнестойкости;

 — трехцветная шкала отображения результатов расчета;

 — многоцветная шкала отображения результатов расчета;

 — цветовая шкала приведенной толщины;

 — цветовая шкала собственного предела огнестойкости;

 — отчет по стальным элементам;

 — формирование групп стержневых элементов;

 — формирование групп пластинчатых элементов;

 — активация операции формирования группы;

 — отмена выбора элементов;

 — выбрать активную группу огнестойкости;

 — индикация на экране элементов активной группы;

 — управление группами огнестойкости;

 — настройка норм проектирования (Сталь);

 — настройка норм проектирования (Бетон).

Кроме того, инструментальная панель содержит список групп огнестойкости.

## Назначение параметров расчета огнестойкости

Параметры расчета назначаются в одноименном диалоговом окне (рис. 22.4-2) и включают выбор температурной кривой (вида пожара) и требуемого предела огнестойкости элементов конструкции. В программе предусмотрен анализ с учетом стандартного, внешнего, тлеющего и углеводородного пожаров.

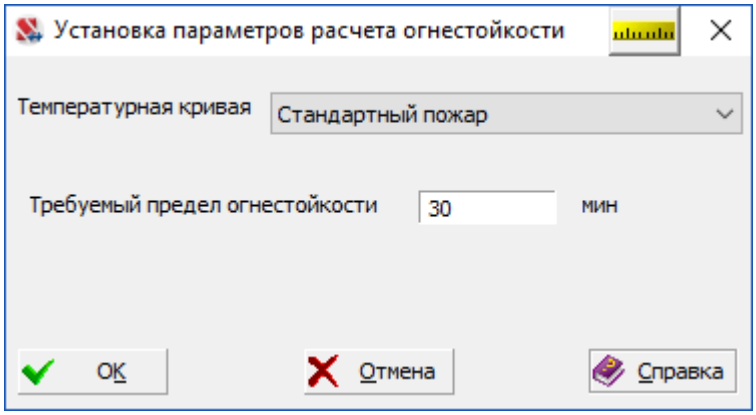



Рис. 22.4-2. *Диалоговое окно* **Назначение параметров расчета огнестойкости**

## Формирование новой группы стержневых элементов

В одну группу стержневых элементов могут входить элементы, имеющие разные типы жесткости, параметры армирования и принадлежность конструктивным группам. Главное условие — все элементы одной группы должны иметь одинаковый тип огневого воздействия.

Для формирования группы следует нажать кнопку  — формирование групп стержневых элементов, выбрать на схеме элементы и нажать кнопку  активации операции. В результате появится диалоговое окно **Группа огнестойкости** (стержни) (рис. 22.4-3).

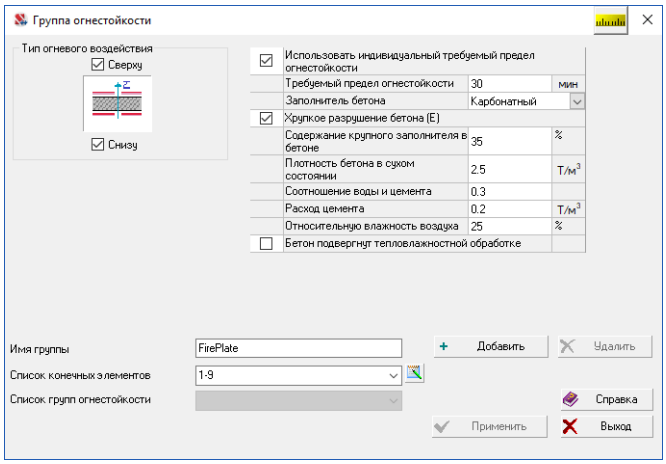



Рис. 22.4-3. Диалоговое окно **Группа огнестойкости** (стержни)

В этом окне следует задать имя группы, выбрать **Тип огневого воздействия** (с помощью маркеров **Сверху**, **Снизу**, **Слева**, **Справа**), то есть положение источника нагрева относительно местных осей элементов группы, задать вид заполнителя (для бетонных элементов) и нажать кнопку **Применить**.

Кроме того, используя маркер **Использовать индивидуальный требуемый предел огнестокости** и соответствующее поле ввода, можно задать индивидуальный для группы предел огнестокости. Если этот маркер не взведен, то будет использован требуемый предел огнестокости, заданный в общих параметрах расчета огнестойкости. Если нужно выполнить анализ хрупкого разрушения бетона, то следует взвести соответствующий маркер и задать необходимые данные (соотношение воды и цемента, расход цемента, содержание крупного заполнителя в бетоне, ...).

Выйти из окна по кнопке **Выход** и подтвердить выполненные назначения в информационном окне (рис. 22.4-4).

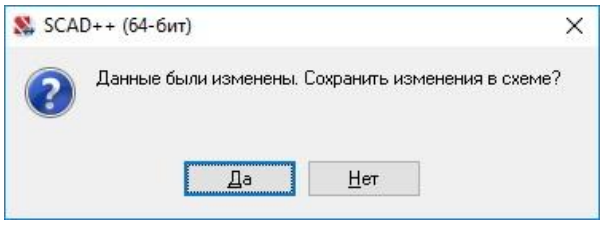



Рис. 22.4-4. Информационное окно

## Корректировка ранее заданных групп огнестойкости

Для изменения параметров групп огнестойкости необходимо выбрать редактируемую группу из списка групп инструментальной панели и нажать кнопку активации операции —  . В диалоговом окне **Группа огнестойкости** (стержни) внести необходимые изменения в параметры группы и нажать кнопку **Применить**. Если предполагается корректировка других групп, то их можно вызвать непосредственно из списка групп огнестойкости в диалоговом окне. После завершения корректировки групп нажать кнопку **Выход** и подтвердить сделанные изменения в информационном окне (рис. 22.4-4).

Если список элементов группы большой, то для его корректировки можно воспользоваться диалоговым окном **Редактирование списка**, которое вызывается нажатием одноименной кнопки —  .

## Удаление групп огнестойкости

Для удаления группы следует выбрать ее в списке групп диалогового окна **Группы огнестойкости** и нажать кнопку **Удалить**.

## Формирование и корректировка групп огнестойкости пластинчатых элементов

Группы огнестойкости пластинчатых элементов формируются в диалоговом окне **Группа огнестойкости** (пластины) по тем же правилам что и стержни (кнопка —  ). Порядок действий при корректировке групп также совпадает с описанным выше порядком действий для стержней. В одну группу могут входить пластины, имеющие разные типы жесткости. Отметим, что при одностороннем нагреве, взведя маркер **Теплоизолирующая способность** и задав начальную температуру, можно произвести соответствующий анализ.

## Управление группами огнестойкости

Управление группами огнестойкости выполняется в одноименном диалоговом окне (рис. 22.4-5) и по тем же правилам, что и конструктивные группы элементов стальных и железобетонных конструкций.

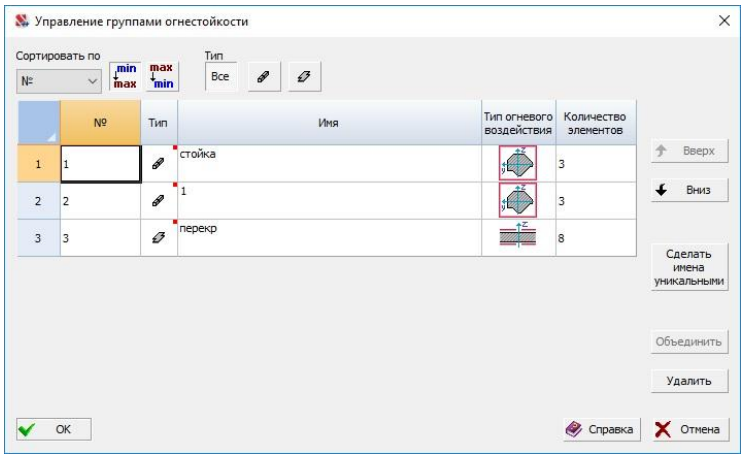



Рис. 22.4-5. *Диалоговое окно* **Управление группами огнестойкости**

## Выбор норм проектирования

Кнопки  и  являются индикаторами выбранных норм и служат для вызова диалоговых окон **Настройка норм проектирования** (рис. 22.4-6, 22.4-7), в которых выполняется их выбор. В текущей версии программы реализованы нормы огнестойкости элементов стальных конструкций EN 1993-1-2:2005 и соответствующий им стандарт Украины ДСТУ-Н Б В.2.6-211:2016, а также стандарт РФ СТО 36554501-006-2006 для элементов железобетонных конструкций.

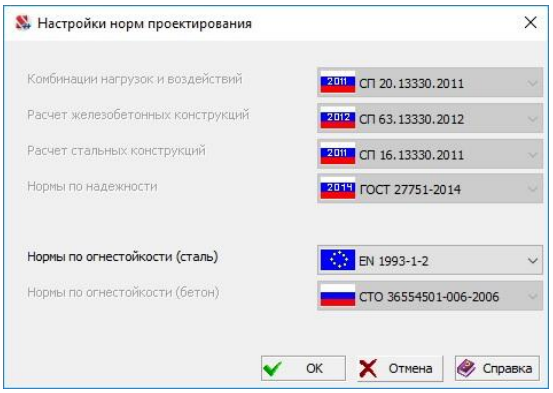



Рис. 22.4-6. Настройка норм проектирования (сталь)

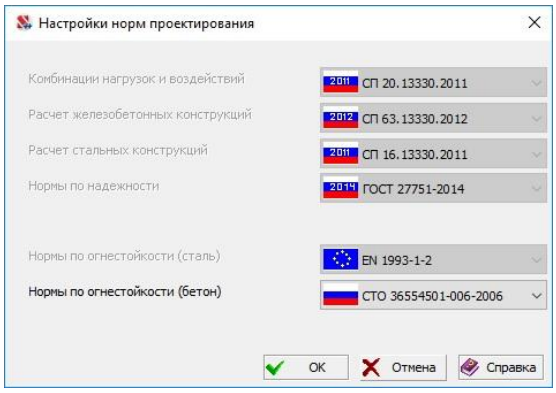



Рис. 22.4-7. Настройка норм проектирования (железобетон)

## 22.5. Анализ огнестойкости элементов

Аналогично тому, как производится анализ результатов экспертизы элементов стальных или железобетонных конструкций, анализ результатов расчета огнестойкости можно произвести с помощью трехцветной  или полноцветной шкалы  .

Если не выбрана ни одна группа огнестойкости, то производится визуализация одного из выбранных в выпадающем списке факторов:

- критического фактора $K_{max}$;
- фактора критического по несущей способности;
- фактора по хрупкому разрушению бетона;
- фактора по теплоизолирующей способности.

После выполнения расчета можно также выполнить анализ огнестойкости отдельного элемента. Для этого используется режим **Информация об элементе**. Если для элемента, входящего в одну из конструктивных групп железобетонных конструкций выполнялся анализ огнестойкости, то в диалоговом окне раздела **Железобетон. Экспертиза** появится страница **Огнестойкость** (рис. 22.5-1).

Следует учесть, что расчет огнестойкости выполняется не для всех типов стальных сечений. Если для сечения анализируемого элемента такой расчет предусмотрен, то в диалоговом окне раздела **Сопротивление сечений** на странице **Сечение** будет доступен маркер **Огнестойкость**, который следует активизировать. После чего станет доступной одноименная страница (рис. 22.5-2).

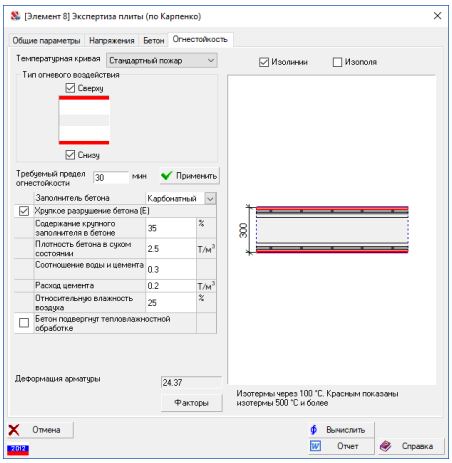



Рис. 22.5-1. Страница **Огнестойкость** для элементов железобетонных конструкций

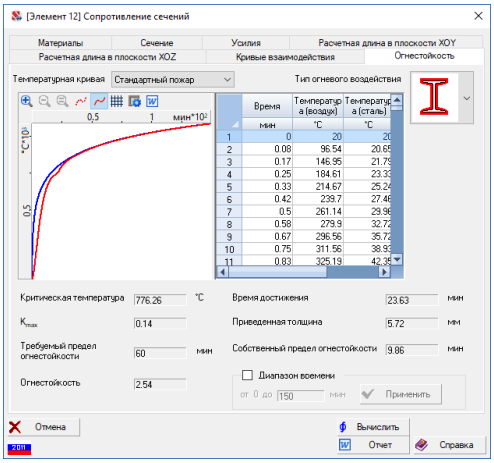



Рис. 22.5-2. Страница **Огнестойкость** для элементов стальных конструкций

Результаты расчета для элементов стальных конструкций включают значение критической температуры и время ее достижения, максимальное значение коэффициента использования ограничений, полученное по результатам прочностного расчета, требуемый предел огнестойкости, относительно которого выполняется расчет и соответствующий ему коэффициент исчерпания огнестойкости (отношение требуемого предела огнестокости ко времени достижения критической для данного элемента температуры). Кроме того, показаны графики и таблица изменения во времени температуры воздуха и температуры в сечении элемента в указанном диапазоне времени.

Для элементов железобетонных конструкций результаты включают максимальное значения коэффициента использования ограничений по огнестойкости и наименование фактора, определившего это значение, диаграмму факторов (вызывается нажатием соответствующей кнопки), а также схему распределения температуры в сечении (изотермы), представленную в виде изополей или изолиний.

Для элементов стальных конструкций можно получить цветовые шкалы приведенной толщины  и собственного предела огнестойкости (без огнезащиты)  , а также создать отчет  по стальным элементам. Приведенная толщина — отношение площади сечения к обогреваемому периметру; собственный предел огнестойкости — время достижения температуры 500°С при

стандартном пожаре, при которой начинается существенное изменение прочности и деформативности (см. таблицу 6 *Пособия по определению пределов огнестойкости строительных конструкций, параметров пожарной опасности материалов. Порядок проектирования* огнезащиты. М. 2013 или Приложение Б СТО АРСС 11251254.001-018-03).

В отчете содержится информация о приведенных толщинах и площади огневого воздействия. Данный отчет может быть использован для назначения способа огнезащиты стальных конструкций и определения объема необходимого для этого материала.

Больше информации о работе на страницах **Огнестойкость** можно получить в описаниях программ-сателлитов **АРБАТ** и **КРИСТАЛЛ**.

# 23. Расчет нагрузок от фрагмента схемы

В комплексе **SCAD** предусмотрена возможность выдачи величин реакций в узлах, имеющих связи. Однако во многих случаях для больших конструктивных схем требуется детализация при исследовании поведения под нагрузкой отдельных фрагментов, каждый из которых требует различной детализации. Типичным примером могут служить конструкции с резкими концентраторами напряжений, при расчете которых в районе концентратора следует использовать достаточно густую конечно-элементную сетку. В таких случаях целесообразно выполнить общий расчет системы с использованием более грубого конечно-элементного разбиения, а затем отдельно исследовать фрагмент с концентратором напряжений.

Аналогичная ситуация возникает в тех случаях, когда для одних целей (например для сбора нагрузок на фундаменты) вполне подходит грубая сетка, а для других целей (например, детальное исследование напряженно-деформированного состояния перекрытия типового этажа и подбора арматуры в этой части конструкции) желательно применить более детальный подход.

Использование фрагментации предполагает, что воздействие отброшенной части системы моделируется нагрузками, передаваемыми ею на выделенный фрагмент, т. е. если мысленно отделить часть конструкции, то ее действие на оставшуюся часть сводится к некоторым нагрузкам. Для повышения точности решения рекомендуется создавать фрагмент «с запасом», отступая от интересующей нас границы на 2-3 ряда конечных элементов (рис. 23-1).

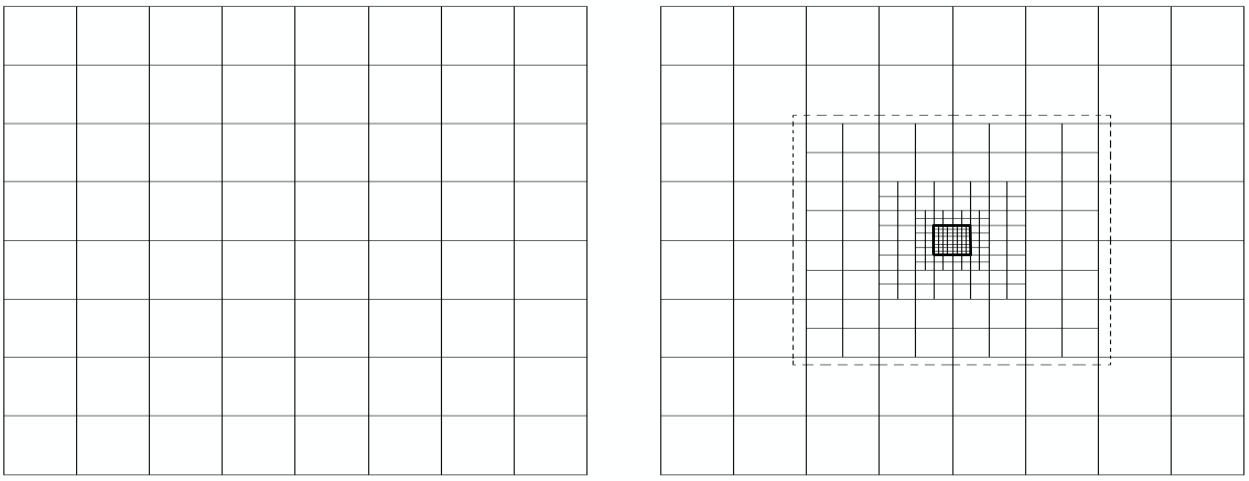


Рис. 23-1. *Выделение фрагмента*:
*слева* — первоначальная система; *справа* — фрагмент с областью сгущения сетки, отстоящей от границы выделения

Режим расчета нагрузок от фрагмента схемы позволяет определить нагрузки в заданных узлах от отделенной части схемы, например, от наземной части расчетной схемы на фундаменты. Имеется возможность сохранить нагрузки как схему. Это означает, что будет создана система, состоящая только из узлов и не имеющая элементов, и будут известны нагрузки на эти узлы. Далее на этих узлах (и на других, дополнительно включаемых) можно построить детальную расчетную модель и выполнить ее расчет. В разделе 23.3 описан анализ результатов расчета нагрузок от фрагмента схемы.

В качестве исходных данных для расчета служат группы узлов, в которых необходимо определить нагрузки, и группы элементов, примыкающих к этим узлам.

При расчете нагрузок на фундаменты задается также угол поворота участка фундамента вокруг оси Z, если оси инерции колонн не совпадают с осями фундамента под этими колоннами. Нагрузки могут быть вычислены как для каждого загружения, так и для комбинаций загружений.

При анализе усилий (реакций), действующих на фрагмент расчетной схемы при наличии некоторых динамических загружений (например, при расчете на сейсмическое воздействие), может возникнуть ситуация, при которой полученные результаты не удовлетворяют условиям равновесия, а их значения намного превышают ожидаемые. Дело в том, что результатом расчета по этому динамическому загружению является свертка перемещений или усилий по всем учитываемым формам собственных колебаний. Эта нелинейная процедура состоит в том, что суммируются квадраты результатов по каждой форме, а затем из этой суммы извлекается квадратный корень. Полученные по правилу «корень из суммы квадратов» усилия в отдельных сечениях и перемещения отдельных точек, которые возникают в процессе сейсмических колебаний, ***соответствуют различным моментам времени*** и поэтому нарушают условия равновесия.

## 23.1. Ввод исходных данных

Подготовку данных для расчета можно выполнить как при формировании расчетной схемы, так и в процессе графического анализа результатов. Выполняется это путем задания групп узлов и элементов в разделе инструментальной панели **Группы**. Дополнительная информация задается в разделе **Специальные исходные данные** (**Дерево проекта**) обращением к операции **Нагрузки от фрагмента схемы**. Кроме того, эта информация может быть задана в препроцессоре (закладка **Специальные**). В этом случае, если пользователь предварительно выполнил селекцию узлов/элементов, то в списке групп узлов/элементов (см. ниже) появится пункт *Селектированные*.

Исходные данные можно задать двумя способами. Первый способ предполагает задание элементов, от которых необходимо получить нагрузки (разрезаемые элементы) и явное задание узлов, в которых нагрузки будут получены. При втором способе отмечается весь изолируемый фрагмент. Нагрузки от него на остальную часть конструкции, включая реакции в связях, будут получены во всех узлах, лежащих на границе выделенного фрагмента. К числу узлов, лежащих на границе фрагмента, относятся узлы, примыкающие к части схемы, не вошедшей во фрагмент, а также узлы, в которых наложены связи.

При первом способе рекомендуется при подготовке исходных данных придерживаться такого порядка действий:

- в разделе **Группы** активировать функцию задания групп элементов —  ;
- отметить на схеме элементы (например, все или только элементы, примыкающие к узлам, в которых будут получены нагрузки);
- сохранить группу элементов, задав ей имя —  ;
- активировать функцию задания групп узлов —  ;
- отметить на схеме узлы, в которых необходимо получить нагрузки;
- сохранить группу узлов, задав ей имя —  ;
- повторить две предыдущие операции для каждой группы узлов, принадлежащих другим участкам схемы.

Обратите внимание на то, что групп узлов может быть несколько. Это связано с тем, что участки фундамента могут иметь различные углы поворота.

Порядок действий при использовании второго способа повторяет первые три операции, описанные выше. Однако при сохранении группы элементов инициируется операция **Создать группу сопряженных узлов**, при выполнении которой группа узлов, лежащих на границе выделенного фрагмента, будет сформирована автоматически.

Кроме того, при добавлении группы элементов можно использовать маркер **Добавлять список сопряженных узлов**, который позволяет автоматически добавлять в список узлов узлы, являющиеся сопряженными к группе добавляемых элементов.

**Расчет нагрузок** может быть выполнен как в общем цикле решения задачи, так и самостоятельно в режиме постпроцессора. В первом случае исходные данные для расчета должны

быть подготовлены до выполнения основного расчета. Во втором — их можно подготовить и после завершения основного расчета.

## 23.2. Описание фрагментов

Для того чтобы выполнить расчет нагрузок от фрагмента схемы, следует задать дополнительную информацию, которая определяет режим выполнения расчета (по загружениям и/или по комбинациям загружений), включает список элементов, приходящих в узлы, в которых вычисляются нагрузки, а также списки узлов.

Дополнительная информация задается в разделе **Специальные исходные данные** (**Дерево проекта**) в диалоговом окне **Нагрузки от фрагмента схемы** (рис. 23.2-1), в котором рекомендуется следующий порядок работы:

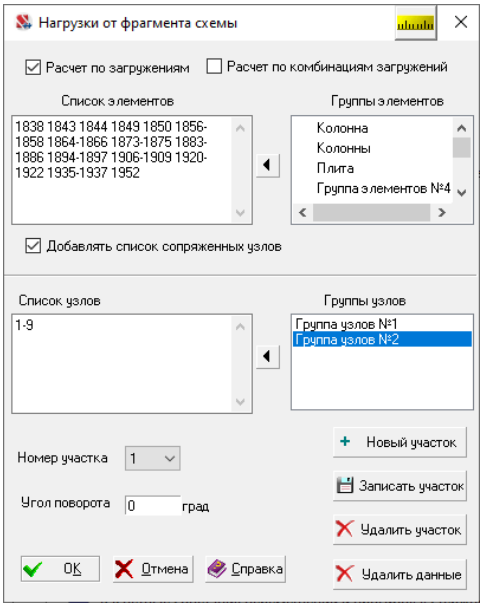



Рис. 23.2-1. *Диалоговое окно* **Нагрузки от фрагмента схемы**

- установить режим выполнения расчета — по загружениям и/или по комбинациям загружений;
- выбрать в списке групп элементов группу, которая задана для выполнения расчета нагрузок от фрагмента схемы;
- нажать кнопку + <<, и тем самым загрузить в поле **Список элементов** номера элементов выбранной группы (список можно откорректировать непосредственно в поле загрузки);
- нажать кнопку **Новый участок** (здесь имеется в виду, например, часть фундамента, в узлах которого вычисляются нагрузки);
- выбрать в списке **Группы узлов** имя группы, принадлежащей этому участку;
- нажать кнопку + <<, и загрузить список узлов выбранной группы в поле **Список узлов**;
- ввести угол поворота участка фундамента, которому принадлежат узлы первой группы, вокруг оси Z общей системы координат (по умолчанию 0°).



**Не допускается наличие одинаковых номеров узлов в разных участках.**

Если предусмотрен расчет нескольких участков фундамента с разными углами ориентации относительно оси Z общей системы координат, то необходимо нажать кнопку **Новый участок** и повторить все описанные выше действия с группами узлов для нового участка, задав его угол ориентации, и т. д.

Завершается ввод данных нажатием кнопки **OK** диалогового окна.

Набор узлов каждого участка можно откорректировать непосредственно в поле **Список узлов**. Кроме того, предусмотрена возможность удаления ошибочно заданных участков. Для этого необходимо установить номер удаляемого участка в выпадающем списке **Номер участка** и нажать кнопку **Удалить участок**. Если необходимо исключить из проекта данные для расчета нагрузок от фрагмента схемы, следует нажать кнопку **Удалить данные**.

## 23.3. Графический анализ результатов расчета нагрузок от фрагмента схемы



Режим позволяет отобразить на расчетной схеме узловые нагрузки, полученные в результате работы постпроцессора расчета нагрузок от фрагмента схемы, а также записать в виде отдельной схемы узлы с приложенными к ним нагрузками.

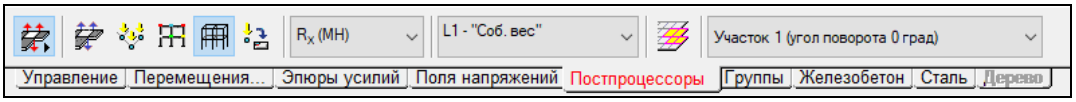



Рис. 23.3-1. *Инструментальная панель режима* **Анализ нагрузок от фрагмента схемы**

Инструментальная панель режима (рис. 23.3-1) включает следующие операции:

 — отображение нагрузок от фрагмента схемы для выбранного загружения;

 — отображение цветовой карты нагрузок от фрагмента схемы;

 — отображение расчетной схемы;

 — запись в виде отдельной схемы узлов с вычисленными нагрузками;

 — визуализация "разрезаемых" элементов;

 — изменение исходных данных.

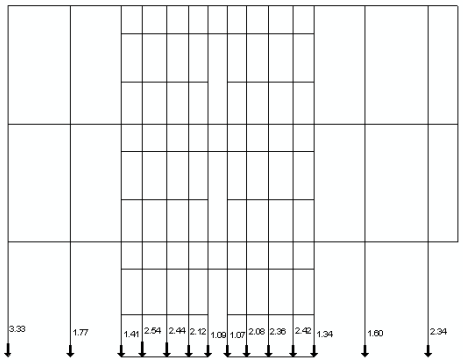



Рис. 23.3-2. *Нагрузки от фрагмента в узлах основания*

Кроме того, панель содержит два списка — для выбора вида нагрузки и для установки номера загружения или комбинации загружений.

Так как работа в этом режиме не отличается от описанных выше режимов анализа результатов, то остановим внимание только на операции сохранения узлов с вычисленными нагрузками в виде отдельной схемы. Эта операция позволяет сохранить под новым именем схему, которая включает только те узлы исходной схемы, в которых получены нагрузки от фрагмента. При этом в новой схеме будут автоматически сформированы все загружения и их комбинации, для которых вычислялись нагрузки.

Полученную схему можно присоединить к другой, ранее созданной схеме (режим сборки), или сформировать схему на базе ее узлов.

Для вывода значений нагрузок используется кнопка фильтров  . Нагрузки могут быть выведены для всех узлов или только для узлов, которые входят в определенный участок (в этом случае в выпадающем списке инструментальной панели следует выбрать нужный участок, а для вывода данных по всем участкам выбрать пункт **Все узлы** в этом списке).

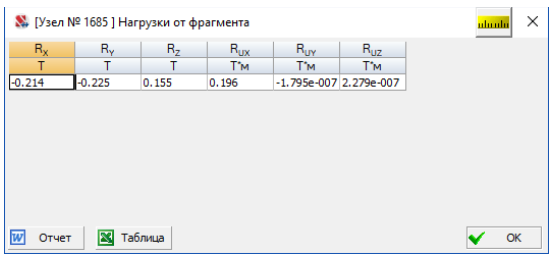



Рис. 23.3-3. *Нагрузки от фрагмента схемы для выбранного узла*

Кнопка  инструментальной панели позволяет окрасить на схеме те элементы, которые в исходных данных были перечислены, как "отброшенные".

Из диалога **Информация об узле** можно (нажав кнопку **Нагрузки от фрагмента**) получить для текущего загружения (или комбинации загружений) таблицу с величинами нагрузок от фрагмента схемы для выбранного узла (рис. 23.3-3).

Кнопка  позволяет активировать диалоговое окно для задания или изменения исходных данных. После использования данной операции следует выйти в дерево проекта и произвести расчет нагрузок от фрагмента схемы.

# 24.Расчет на прогрессирующее (лавинообразное) обрушение

Термин "прогрессирующее обрушение" относится к ситуации, когда разрушение или повреждение какой-либо малой части конструкции ведет к полному или почти полному разрушению всей конструкции. Аварийные ситуации могут быть вызваны как деятельностью человека, так и природными явлениями. В первом случае к ним относятся взрывы газа, теракты, пожары, наезды транспорта, дефекты проектирования, строительства и эксплуатации зданий, неквалифицированная их реконструкция (с надстройкой, пристройкой, перепланировкой помещений), сопровождаемая ослаблением или перегрузкой несущих элементов и оснований и др. Аварийные ситуации могут вызываться такими природными явлениями как землетрясения, ураганы, оползни, неравномерные деформации оснований.

Поскольку невозможно полностью исключить вероятность возникновения аварийных воздействий или ситуаций, то необходимо обеспечить определенную степень безопасности находящихся в зданиях людей и сохранности их имущества за счет уменьшения вероятности прогрессирующего обрушения при локальных разрушениях несущих конструкций.

Для предупреждения прогрессирующего обрушения может быть предусмотрено общее упрочнение всего здания, местное усиление и взаимосвязь элементов. В большинстве американских норм предпочтение отдается общему упрочнению, при котором разрушение одного из элементов здания не приводит к разрушению всего строения. Местное усиление, т. е. упрочнение наиболее чувствительных мест, трудно поддается стандартизации для включения в нормы проектирования, т.к. для этого нужно четко представлять характер возможных воздействий на здание, в т.ч. террористических атак. Конструктивная взаимосвязь элементов или непрерывность конструкции, также является способом общего или местного упрочнения.

Основные положения действующих рекомендаций по предотвращению прогрессирующего обрушения могут быть представлены следующими пунктами:

1. Несущая система жилых зданий должна быть устойчива к прогрессирующему (цепному) обрушению в случае локального разрушения отдельных конструкций при аварийных воздействиях (взрыв бытового газа, пожар и т. п.).

2. Допускаются локальные разрушения отдельных несущих конструкций, но эти первичные разрушения не должны приводить к обрушению соседних конструкций, на которые передается нагрузка, воспринимавшаяся ранее элементами, поврежденными в результате аварийного воздействия.

3. Конструктивная система здания должна обеспечивать его прочность и устойчивость, как минимум на время, необходимое для эвакуации людей. Перемещения конструкций и раскрытие трещин в них не ограничивается.

4. Устойчивость к прогрессирующему обрушению проверяется расчетом на особое сочетание нагрузок и воздействий, включающее постоянные и временные длительные нагрузки, а также воздействие гипотетических локальных разрушений несущих конструкций.

5. Расчетные характеристики материалов повышают за счет специальных коэффициентов надежности. Кроме того, расчетные сопротивления умножают на коэффициенты условий работы, учитывающие малую вероятность аварийных воздействий и рост прочности бетона после возведения здания, а также возможность работы арматуры за пределом текучести.

В комплексе **SCAD** режим реализован в соответствии с действующими рекомендациями и предназначен для моделирования поведения конструкции зданий и сооружений в случае аварийных воздействий, вызвавших локальные разрушения отдельных вертикальных несущих элементов. При реализации авторами принималась во внимание очевидная условность исходных предпосылок, заключающаяся в следующем:

- нет достоверной информации о месте и причине возникновения процесса и характере его протекания;
- реальные параметры разрушения могут далеко отстоять от условий прочности, приведенных в нормах, т. к. известно, что расчетные значения параметров прочности могут существенно отличаться от наблюдаемых в натуре.

Сооружения не могут быть совершенно свободными от риска обрушения из-за неопределенностей требований к системе, разброса технических свойств строительных материалов, трудностей адекватного моделирования поведения системы даже с использованием современных программных комплексов. Кроме того, невозможно запроектировать и построить абсолютно безопасное сооружение и при этом не учитывать стоимость предотвращения аварийных ситуаций.

Таким образом, в результате численного моделирования можно получить качественную оценку характеристик устойчивости конструкции по отношению к прогрессирующему обрушению, а также сопоставить несколько возможных сценариев обрушения с целью выявления слабых мест конструкции.

В настоящее время известны четыре подхода к анализу сооружений на прогрессирующее обрушение: статический линейный анализ, статический нелинейный анализ, динамический линейный анализ и динамический нелинейный анализ.

В расчетном комплексе **SCAD** реализованы как квазистатический линейный и нелинейный методы анализа, использующие коэффициенты динамичности, так и прямой динамический линейный и нелинейный анализ.

В основу расчета на прогрессирующее обрушение положены следующие положения:

- в качестве исходной модели конструкции здания для расчета на прогрессирующее обрушение принимается модель, полученная по результатам прочностного анализа и последующего подбора арматуры в элементах железобетонных конструкций и сечений элементов стальных конструкций;
- элементы расчетной схемы, моделирующие внезапно удаляемые элементы сооружения, объединяются в группы; количество элементов сооружения, одновременно вышедших из строя (обрушившихся), не ограничивается;
- расчет выполняется для комбинации загружений, включающей нормативные значения постоянных нагрузок и временных нагрузок (длительные части) с коэффициентом 1;
- для учета внезапности удаления элементов конструкции и эффекта падения обрушившихся конструкций вводятся коэффициенты динамичности;
- проверка элементов железобетонных и стальных конструкций, входящих в состав расчетной схемы после внезапного удаления элементов, выполняется только с учетом первого предельного состояния;
- расчетные прочностные и деформационные характеристики материалов принимаются равными их нормативным значениям;
- поскольку в результате расчета на прогрессирующее обрушение чаще всего возникают большие перемещения, рекомендуется выполнять расчет в геометрически нелинейной постановке.

*а*) *б*)

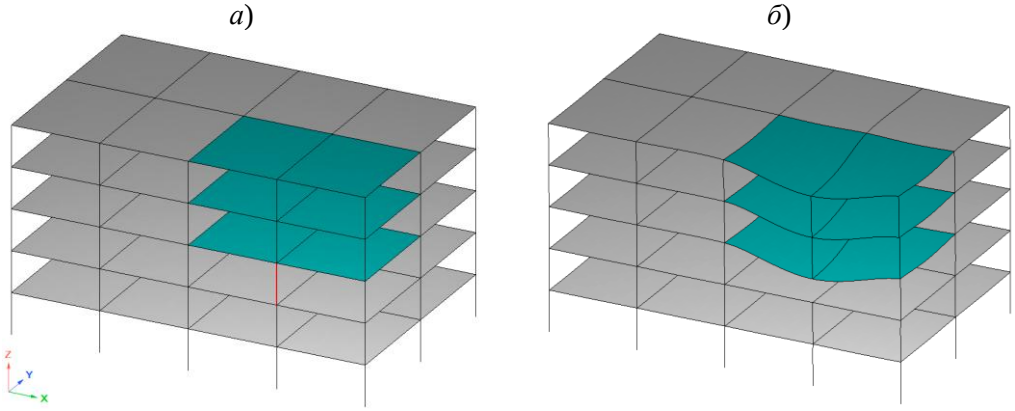


Рис. 24-1. Первичная и вторичная расчетные схемы

Расчетный анализ на устойчивость против прогрессирующего обрушения выполняется в квазистатической или динамической постановке. Квазистатическая постановка включает следующие процедуры:

- по принятой на начальной стадии первичной (рис. 24-1.*а*) расчетной схеме определяется предшествующее отказу напряженно-деформированное состояние в элементах конструктивной системы;
- в первичной расчетной схеме выключается один или несколько из несущих элементов и строится вторичная расчетная схема с исключенными элементами (рис. 24-1.*б*);
- *Мгновенное удаление* выключаемого элемента моделируется усилиями, определенными в этом элементе при расчете по первичной расчетной схеме, *прикладываемыми во вторичной расчетной схеме с обратным знаком*;
- проводится расчет конструктивной системы с удаленным элементом по вторичной расчетной схеме, и определяют напряженно-деформированное состояние в элементах конструктивной системы, возникающее при локальном разрушении (выключении несущего элемента);
- проводится проверка несущей способности элементов конструктивной системы и оценивают возможность дальнейшего развития разрушений.

Динамический анализ производится так же, как и статический:

- первый этап требует определения напряженно-деформированного состояния сооружения от действия приложенных нагрузок;
- на втором этапе производится удаление назначенных конечных элементов в заданный момент времени согласно принятому сценарию. При этом достигнутое на первом этапе равновесное состояние системы будет нарушено, и конструкция приходит в движение.

Если выбран динамический линейный анализ, а вторичная расчетная модель является геометрически неизменяемой, то движение системы носит характер затухающих колебаний. При этом необходимо отслеживать величины усилий в элементах конструкций и, если в соответствии с принятыми критериями разрушения какие-то элементы оказываются разрушенными, то они удаляются из расчетной модели.

Если используется динамический нелинейный анализ с учетом физической нелинейности, то в случае реализации прогрессирующего обрушения движение контрольных узлов расчетной модели носит неограниченно нарастающий характер. Если же прогрессирующее разрушение при выбранном сценарии не состоялось, то движение контрольных узлов расчетной модели носит характер затухающих колебаний. Анализируя накопленные повреждения в конечных элементах, проектировщик должен принять решение об усилении данной конструкции, либо считать ее текущее состояние приемлемым. При выполнении нелинейного динамического анализа настоятельно рекомендуется одновременно с физической нелинейностью учесть и геометрическую нелинейность.

## 24.1. Квазистатический анализ

При использовании квазистатического анализа напряженное состояние железобетонных и стальных элементов вторичной расчетной схемы проверяется по обычным правилам, предусмотренными соответствующими нормами проектирования, но только по требованиям первого предельного состояния.

Если во вторичной системе отсутствуют элементы, не прошедшие проверку несущей способности, то устойчивость системы к прогрессирующему обрушению обеспечена. Если же во вторичной схеме обнаружены элементы, не обладающие необходимой несущей способностью, можно повторить анализ, расширив список выключенных элементов.

### Подготовка данных

Расчет на прогрессирующее обрушение выполняется в два этапа. Первый этап включает следующие действия:

- статический и динамический (если это необходимо) расчеты с целью определения напряженно-деформированного состояния конструкции в нормальных условиях эксплуатации;

- выбор расчетных сочетаний усилий (РСУ);
- подбор арматуры в элементах железобетонных конструкций с учетом первого и второго (трещиностойкость) предельных состояний;
- проверка и подбор прокатных сечений элементов стальных конструкций.

## Диалоговое окно Прогрессирующее обрушение

Для выполнения второго этапа необходимы дополнительные данные, которые задаются в диалоговом окне **Прогрессирующее обрушение** (рис. 24.1-1). Окно появляется после активации одноименной операции в разделе **Специальные исходные данные** дерева проекта. Кроме того, эта информация может быть задана в препроцессоре (закладка **Специальные**). В этом случае, если пользователь предварительно выполнил селекцию элементов, то в списке групп элементов (см. ниже) появится пункт *Селектированные*.

В состав дополнительных данных входят:

- список конечных элементов, входящих во внезапно удаляемый элемент конструкции;
- проверочная комбинация загружений;
- группа нагрузок, определяющая вес обрушившихся конструкций (в том случае, если активен соответствующий маркер);
- коэффициент перегрузки (динамичности) — $K_f$ для корректировки реакции системы при внезапном удалении элемента конструкции (по умолчанию принимается $K_f = 2$);
- коэффициент перегрузки — $K_g$ для корректировки реакции системы на внезапное обрушение вышедших из строя конструкций (по умолчанию принимается $K_g = 1$).

Если выполняется нелинейный расчет, то следует назначить метод расчета и задать соответствующие методу параметры (количество шагов, количество итераций).

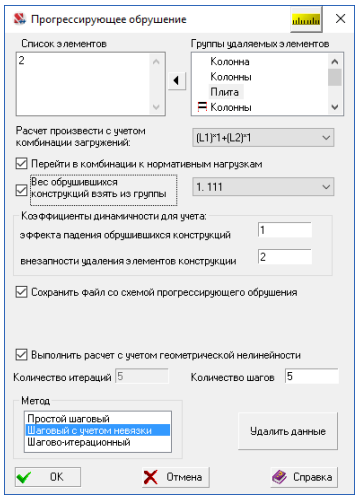



Рис. 24.1-1. *Диалоговое окно* **Прогрессирующее обрушение**

Номера внезапно удаляемых элементов задаются в поле **Список элементов**. Если такие элементы были заранее объединены в одну или несколько групп, то загрузка выполняется путем селекции нужных групп в списке **Группы удаляемых элементов** с последующей их передачей в поле **Список элементов** кнопкой ‹‹.

Список групп включает все сформированные группы элементов. Внезапно удаляемые элементы могут входить в состав любых групп. В этом случае корректировка списка элементов выполняется после их загрузки в поле **Список элементов**.

Окно **Прогрессирующее обрушение** будет доступно только в том случае, если в составе исходных данных есть группы элементов (исходя из предположения, что среди этих групп есть такие, которые содержат списки внезапно удаляемых элементов), а также комбинации загружений (исходя из предположения, что среди этих комбинаций есть такая, которая включает необходимый набор постоянных и длительных нагрузок, на действие которых выполняется проверка поврежденной конструкции).

Если коэффициенты комбинации загружений сформированы таким образом, что результат соответствует действию расчетных нагрузок, то для получения корректного решения необходимо активировать маркер **Перейти в комбинации к нормативным нагрузкам**, и в этом случае переход к нормативным значениям будет выполнен автоматически (путем деления на соответствующие коэффициенты надежности по нагрузке).

Если заранее подготовлена группа нагрузок, характеризующая вес конструкций, обрушившихся в результате внезапного удаления элементов, то она будет учтена в том случае, если активен маркер **Вес обрушившихся конструкций взять из группы …**.

Активация расчета на прогрессирующее обрушение выполняется из одноименного раздела группы **Расчет** дерева проектов. Если в окне **Прогрессирующее обрушение** активен маркер **Выполнить**

**расчет с учетом геометрической нелинейности**, то автоматически будет выполнен указанный вид расчета (при этом необходимо включить а расчетную схему элементы, учитывающие геометрическую нелинейность).

При расчете на прогрессирующее обрушение **SCAD** создает специальный файл со схемой, в которой отсутствуют удаляемые элементы, приложены соответствующие нагрузки, ... . По умолчанию, этот файл после расчета удаляется, но маркер **Сохранять файл со схемой прогрессирующего обрушения** позволяет этот файл сохранить и, при необходимости открыть его, выполнить расчет и проанализировать, например, деформированную схему. Этот файл создается в той же директории, в которой находится основной файл, а его имя имеет дополнительный суффикс [Destr]. В данном файле создается также группа нагрузок с именем *Dynamic Reaction*, в которой содержатся нагрузки, соответствующие реакциям удаленных элементов конструкции с учетом заданного пользователем коэффициента динамичности для учета внезапности удаления.

## Особенности использования результатов подбора арматуры

Как уже отмечалось выше, расчет на прогрессирующее обрушение элементов железобетонных конструкций выполняется путем их проверки по первому предельному состоянию (прочности). Таким образом, перед указанной проверкой для элементов конструкции должна быть задана арматура.

Для каждой конструктивной группы стержневых элементов схема армирования (размещение арматуры на различных участках стержня) может быть или полностью задана пользователем, или полностью принята в соответствии с результатами автоматического подбора. Для преобразования результатов автоматического подбора используется операция **Задание армирования по результатам подбора** в разделе **Подбор арматуры** инструментальной панели **Железобетон**. Задание схемы армирования пользователем выполняется с помощью одноименной операции в разделе **Экспертиза железобетона** инструментальной панели **Железобетон** или в инструментальной панели **Назначение** препроцессора.

Аналогично организована работа и с пластинчатыми элементами. Но, в отличие от стержней, при выполнении операции **Задание армирования по результатам подбора** предусмотрена возможность назначения правил преобразования подобранной арматуры в заданную (перераспределение арматуры в группе).

***В режиме анализа прогрессирующего обрушения в расчет принимается только заданная арматура.***

Данные об армировании каждого конечного элемента, используемые при расчете прогрессирующего обрушения, доступны из раздела **Заданное армирование** информации об элементе.

## Расчет



В программе принят следующий порядок выполнения расчета:

- определяются реакции в узлах, вышедших из строя элементов, примыкающих к остальной части схемы, от проверочной комбинации нагрузок;
- полученные значения реакций добавляются в расчетную комбинацию с коэффициентом $K_f$;
- в проверочную комбинацию добавляется группа нагрузок от веса обрушившихся конструкций с коэффициентом $K_g$ (если такая группа была задана);
- формируется новая расчетная схема, в которой разрушенные элементы будут неактивны;
- выполняется расчет полученной схемы на проверочную комбинацию;
- формируются расчетные сочетания усилий;
- выполняется экспертиза несущей способности элементов стальных и железобетонных конструкций.

При экспертизе стальных и железобетонных элементов используется специальный коэффициент надежности по ответственности $\gamma_a$. Если в качестве норм по надежности выбран ГОСТ 27751, ГОСТ Р 54257-2010 или ГОСТ 27751-2014, то $\gamma_a$=1,0. Для норм ДБН В.1.2-14-2009

коэффициент задается пользователем для каждого конструктивного элемента или группы конструктивных элементов.

## Анализ результатов

Результаты расчета на прогрессирующее обрушение отображаются в графической форме в трехцветной цветовой шкале. Управление отображением расположено в разделе **Прогрессирующее обрушение** инструментальной панели **Постпроцессоры**.

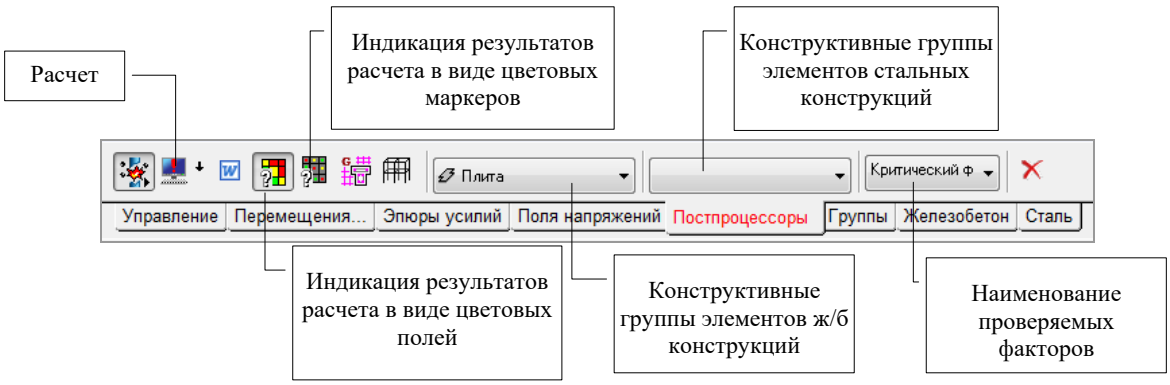



Рис. 24.1-2. Раздел **Прогрессирующее обрушение** инструментальной панели

Операция позволяет выделить на схеме элементы, которые в исходных данных перечислены, как удаляемые. Эти элементы будут «подсвечены» на схеме фиолетовым цветом.

В трехцветной шкале элементы разделяются по цвету на работающие ($K_{max} < 1$), у которых значение максимального по величине коэффициента использования ограничений $K_{max}$ меньше единицы (по умолчанию для них принят зеленый цвет), и вышедшие из строя ($K_{max} \geq 1$) — для них принят красный цвет. Третий цвет (по умолчанию — желтый) используется для указания элементов, попавших в интервал неопределенности, т. е. таких, которые, по мнению расчетчика, с одинаковой вероятностью могут быть отнесены и к выбывшим из строя, и к работающим. Значение интервала неопределенности (в % от $K_{max}$) назначается пользователем с помощью операции **Настройки цветовой шкалы** в окне шкалы. Результаты могут выводиться в виде цветовых полей или цветовых маркеров (кнопки и соответственно). Кнопка позволяет получить экстремальные значения факторов (аналогично тому, как это делается при анализе элементов стальных и железобетонных конструкций).

Если цветовая индикация результатов расчета (значений коэффициента использования ограничений $K_{max}$) выполняется без указания конкретной конструктивной группы, то для каждого конечного элемента выбирается цвет, соответствующий значению максимального из коэффициентов, без указания фактора, определившего это значение.

В тех случаях, когда из списка конструктивных групп выбрана конкретная группа, для нее может быть получена цветовая шкала не только значений $K_{max}$, но и коэффициентов использования ограничений любого из предусмотренных факторов. Выбор факторов выполняется из соответствующего списка в инструментальной панели (рис. 24.1-2).

Заметим, что найденные неработающие элементы – это те, которые отказали на первом же шаге процесса лавинообразного распространения обрушений. Если их включить в список конечных элементов, входящих во внезапно удаляемый элемент конструкции и определить, куда передается нагрузка с этих элементов после их разрушения, то можно получить картину разрушений на втором шаге и т. д. Однако, чаще потребуется выполнить усиление элементов (может быть, не всех), попавших в неработающие по результатам первого шага, и повторить расчет уже для усиленной конструкции. Усиливаемые элементы следует объединять в соответствующие группы армирования или группы стальных элементов.

После выполнения расчета для конкретного конечного элемента можно использовать диалоговое окно **Информация об элементе**, активируемое кнопкой фильтров  . В этом окне, используя кнопки **РСУ (прогрессирующего обрушение)** и **Прогрессирующее обрушение** можно получить данные о расчетных сочетаниях усилий, которые использовались при расчете (рис. 24.1-3) и факторах, вычисленных при экспертизе элемента (рис. 24.1-4). Маркер **Показать усилия** позволяет получить альтернативное представление информации, при котором будут показаны усилия/напряжения в элементе.

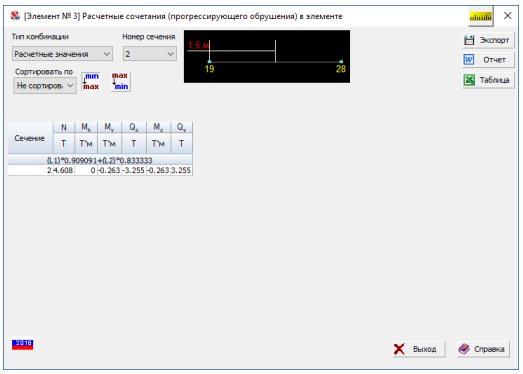



Рис. 24.1-3. *Диалоговое окно* **Расчетные сочетания (прогрессирующего обрушения) в элементе**

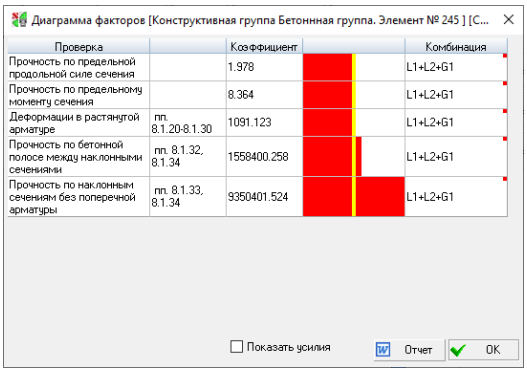



Рис. 24.1-4. *Диалоговое окно* **Диаграмма факторов**

Кроме того, аналогично анализу элементов стальных и железобетонных конструкций, реализован вызов операции **Сопротивление сечений (прогрессирующее обрушение)**.

## 24.2. Динамический анализ

Динамический анализ выполняется в процессе прямого интегрирования уравнений движения (см. раздел 15), при этом расчетная схема должна учитывать физическую нелинейность материала для несущих конструктивных элементов. Предполагается, что все нагрузки на систему медленно возрастают с течением времени, а первичный отказ (выбытие) заданной группы элементов происходит через заданный промежуток времени от начала процесса. Поэтому не требуется выполнения предварительного статического анализа с целью определения внутренних усилий удаляемых элементов.

В процессе интегрирования уравнений движения могут возникать частичные (повреждение) или полные (разрушение) отказы элементов системы. Эти события фиксируются в тексте протокола и могут быть представлены графически. Таким образом автоматически возникают вторичная, третичная и т.д. расчетные схемы. Процесс автоматически продолжается до конца интервала времени, заданного для анализа, но может остановиться, если система в результате накопленных разрушений стала геометрически изменяемой.

### Подготовка данных

Для анализа прогрессирующего разрушения необходимо включить маркер «Прогрессирующее обрушение». Данный метод расчета основан на нелинейном динамическом анализе, причем все опции нелинейного динамического анализа доступны и должны быть установлены.

Задание сценария начального разрушения осуществляется при нажатии на кнопку  при маркере «Прогрессирующее обрушение» (диалог «Параметры динамических воздействий» – рис. 15.2-2). При этом появляется диалог, изображенный на рис. 24.2-1.

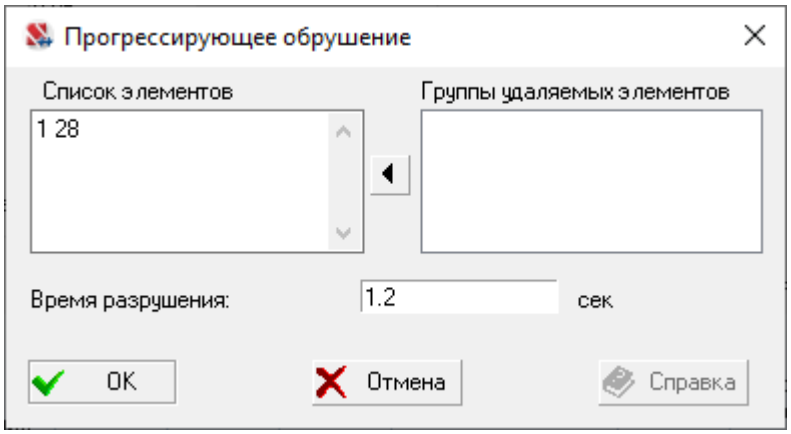



Рис. 24.2-1. Параметры динамического анализа на прогрессирующее обрушение

В окне «Список элементов» необходимо задать номера конечных элементов, подлежащих удалению, а в окне «Время разрушения» – момент времени, в который эти элементы будут удалены.

Относительно нагрузок на систему предполагается, что они постепенно и медленно возрастают от нуля до тех значений, при которых происходит удаление (разрушение) элементов. Далее они остаются постоянными. При этом следует предусмотреть после окончания роста нагрузок отрезок времени $t_0$, предназначенный для затухания малых колебаний, вызванных медленным приложением нагрузки (рис. 24.2-2). Рекомендуется назначать время $t_0$ порядка 1-4 периодам основного тона собственных колебаний, а запас времени $t_d$ - $t_0$ – порядка 1-2 периодов.

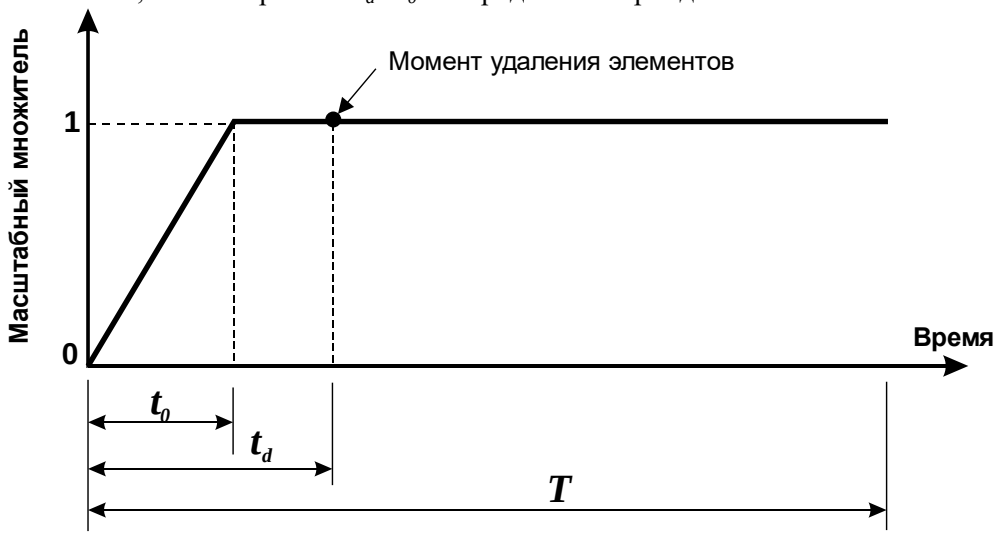



Рис. 24.2-2. График функции времени

## Расчет

Расчет выполняется вызовом операции ***Нелинейный расчет*** в дереве проекта.

## Представление и анализ результатов

Графики типа **«результат - время»** позволяют проследить за перемещениями характерных узлов и усилиями в наиболее важных элементах. Рекомендуется построить и проанализировать несколько таких графиков, чтобы убедиться в отсутствии непонятных выбросов и убедиться, что процесс колебаний системы затух в достаточной мере. Если такое затухание не обнаружено, то следует увеличить задаваемое время анализа $T$.

**Состояния системы** в любой момент времени может быть продемонстрировано при выборе операции  , которая доступна в закладках **Эпюры усилий** и **Поля напряжений**, и позволяет

получить цветовую шкалу (рис. 24.2-3) элементов, в которых возникли те или иные повреждения или разрушения (текучесть арматуры, разрушение бетона, ...).

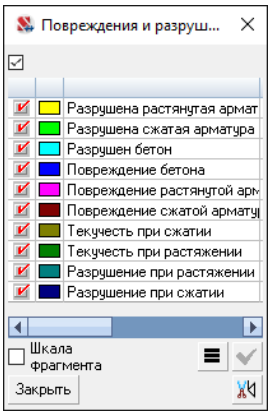



Рис. 24.2-3. *Цветовая шкала* ***Повреждения и разрушения***

Используя стандартные возможности цветовой шкалы, можно фрагментировать или селектировать элементы, в которых возникли те или иные разрушения, и с помощью операции  на закладке **Поля напряжений** определить площадь локального разрушения (в некоторых нормативных документах по защите от прогрессирующего обрушения содержатся ограничения на величину этой площади).

# 25. Анализ устойчивости

В данном постпроцессоре для каждого выбранного загружения (или комбинации загружений) определяется:

- коэффициенты запаса устойчивости;
- формы потери устойчивости;
- свободные длины стержневых элементов.

## 25.1. Постановка задачи

Задача устойчивости решается в классической постановке для упругой системы (см. разд. 2.5) и в предположении, что все приложенные к системе внешние нагрузки (следовательно, и внутренние силы) растут пропорционально одному и тому же параметру $\lambda$. То значение параметра $\lambda$, при котором матрица жесткости системы $K(\lambda)$ впервые перестает быть положительно определенной, является критическим, а соответствующее значение $\lambda$ — *коэффициентом запаса устойчивости* (КЗУ). Матрица жесткости $K(\lambda) = K_0 - K_1(\lambda)$ состоит из «обычной» матрицы жесткости $K_0$ и матрицы «толкающих» реакций $K_1(\lambda)$, которые определяются сжимающими силами в стержнях, напряжениями сжатия в конечных элементах оболочечного типа и т. п. (см. разд. 2.5.7). Напомним, что положительная определенность матрицы жесткости означает, что при любых значениях узловых перемещений и поворотов упругий потенциал положителен (это значит, что для деформирования системы необходимо затратить энергию и, следовательно, она оказывает сопротивление деформированию, *являясь отпорной*).

Если система теряет устойчивость, она теряет отпорность, и ее матрица жесткости становится вырожденной (с нулевым детерминантом), а в закритическом состоянии система получает отрицательную отпорность (при ее принудительном деформировании выделяется ранее накопленная потенциальная энергия «толкающих» реакций), и ее матрица жесткости становится знаконеопределенной.

Таким образом, задача оценки устойчивости равновесия сводится к проверке положительной определенности матрицы жесткости при пробном значении коэффициента $\lambda$.

Необходимо отметить, что с помощью проверок матрицы жесткости можно отыскать только те критические состояния, при которых потеря устойчивости происходит по форме, когда не все узловые перемещения и повороты равны нулю (это т. н. явная форма потери устойчивости). Кроме того, проверяется, что при пробном значении $\lambda$ не происходит скрытая форма потери устойчивости, которая реализуется в пределах одного конечного элемента и не вызывает узловых перемещений и поворотов. Поскольку для всех типов конечных элементов соответствующие критические величины $\lambda_{кр}$ известны (они вычисляются по простым формулам), то это значит, что следует, кроме всего прочего, проверить неравенство $\lambda > \lambda_{кр}$ для всех конечных элементов.

При необходимости, можно вычислить заказанное число коэффициентов $\lambda$ и соответствующих им форм потери устойчивости. Это особенно важно, например, при наличии кратных форм.

Важно отметить, что **устойчивость теряет система в целом**, т. е. все ее элементы. Для того чтобы проиллюстрировать это принципиальное положение, представим себе сжатый стержень, расчетная схема которого набрана из цепочки конечных элементов типа «пространственный стержень». Если этот стержень сжат силой $P$, то он может потерять устойчивость при некотором ее значении, в $k$ раз большем заданного (то есть $k$ — коэффициент запаса устойчивости). Возникает вопрос, какой из конечных элементов, продольная сила в котором в момент потери устойчивости будет равна $kN = kP$, потерял устойчивость? Естественно, что все элементы, составляющие стержень. Этот же вывод относится и к любой расчетной схеме. Несмотря на то, что потеря устойчивости характеризует всю систему, это не означает, что все её элементы в равной степени ответственны за появление критического состояния. Их конкретную роль можно оценить с помощью анализа энергетической картины явления (см. главу 26).

Классическая теория устойчивости равновесия, излагаемая в большинстве курсов строительной механики и обычно используемая при расчете строительных конструкций, предполагает (к сожалению, чаще всего молчаливо), что все внутренние силы возрастают пропорционально одному

параметру, а соотношение между ними при этом остается неизменным. При этом даже для линейных систем полученный классическим способом коэффициент запаса устойчивости может не иметь четкого физического смысла. Действительно, представим себе конструкцию с элементами, сильно сжатыми за счет постоянной нагрузки $G_0$ от собственного веса, и в дополнение нагруженными временной нагрузкой $P_0$ (рис. 25.1-1).

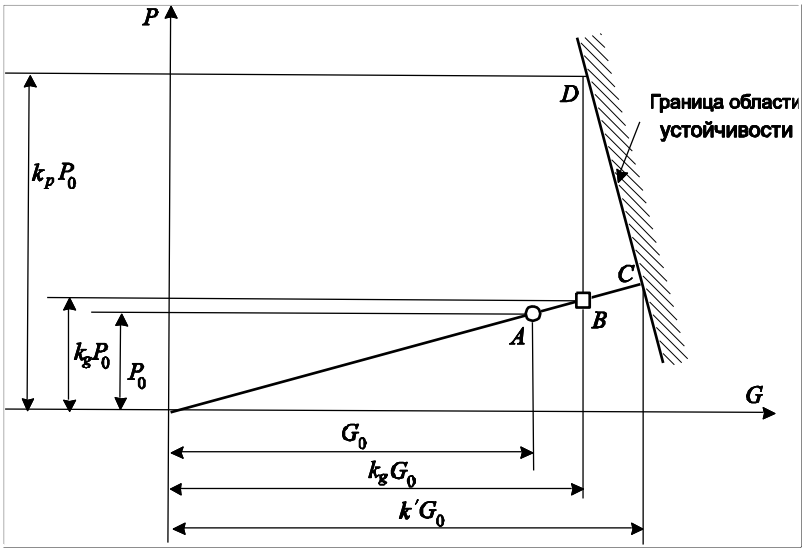



Рис. 25.1-1. *Непропорциональный рост нагрузок*

Коэффициент запаса $k' = 1{,}25$ для суммарной нагрузки соответствует явно нереальному росту собственного веса на 25%. Если же выделить возможный рост собственного веса, например, на 10% (то есть положить $k_g = 1{,}1$), то для достижения критического состояния временная нагрузка должна вырасти намного больше. Естественно, что при таком рассуждении, графическая иллюстрация которого представлена на рис. 25.1-1, довольно скромный коэффициент запаса 1,25 предстает совсем в другом свете ($k_p > 1{,}25$). Результат, разумеется, будет очень зависеть от вида границы области устойчивости, и при другой ее конфигурации все коэффициенты запаса могут оказаться такими, что значение $k_pP_0$ будет существенно меньшим. Но важно отметить сам факт недостаточной точности анализа системы с привычной трактовкой коэффициента запаса по устойчивости.

Поэтому реализован вариант, когда на систему действуют два загружения, из которых изменяется только одно (см. разд. 2.5).

## 25.2. Поиск коэффициентов запаса устойчивости

Поиск коэффициентов запаса устойчивости ведется в интервале $[0,\Lambda]$, где $\Lambda$ — заданное число, соответствующее значению КЗУ, которое считается уже безразличным для оценки качества системы, и с заданной точностью $\varepsilon$. При этом решается задача определения минимального $\lambda$, затем следующего за ним по величине, при которых происходит вырождение матрицы $K(\lambda)$.

Матрица $K(\lambda)$ составляется из матриц устойчивости отдельных конечных элементов. Если в системе нет ни одного элемента, способного терять устойчивость (например, в стержневой системе все стержни растянуты), то выдается сообщение, что система «*абсолютно устойчива*».

Далее проверяется устойчивость системы при $\lambda = \Lambda$ (т. е. положительная определенность матрицы $K(\Lambda)$). Если это условие выполнено, то выдается сообщение о том, что КЗУ больше заданного максимума.

Если условие положительной определенности $K(\Lambda)$ не выполнено (об этом свидетельствуют отрицательные значения на главной диагонали матрицы жесткости, преобразованной в процессе решения системы уравнений), производится анализ положительной определенности матрицы $K(\Lambda/2)$,..., т. е. используется стандартный метод половинного деления. Этот процесс продолжается до тех пор, пока не найден интервал $(\lambda_1, \lambda_2)$ такой, что $\lambda_2 - \lambda_1 \le \varepsilon$ ($\varepsilon$ — заданная пользователем

точность определения КЗУ) и матрица $K(\lambda_1)$ положительно определена, а матрица $K(\lambda_2)$ этим свойством не обладает. При этом величина $\lambda_1$ считается КЗУ.

На этом шаге при составлении матрицы устойчивости для каждого конечного элемента (способного терять устойчивость) вычисляется значение $\lambda_{кр}$, которое приводит к потере устойчивости элемента. Если $\min \lambda_{кр} < \Lambda$, интервал поиска сокращается, а номер элемента, для которого достигается минимум $\lambda_{кр}$, сообщается в протоколе.

## 25.3. Формы потери устойчивости

В предположении, что определенные на первом этапе коэффициенты запаса устойчивости являются точными, выполняется решение задачи об определении собственного вектора при известном *i*-м собственном значении задачи (см. разд. 2.5.7)

$$[K_0 - K_i(\lambda_i)]\,\mathbf{u} = 0. \qquad (25.3.1)$$

Заметим, что правые части системы равны нулю, т. е. отыскиваются такие значения узловых перемещений и поворотов **u**, которые вызываются только внутренними сжимающими напряжениями и усилиями. Поперечные нагрузки, как известно, не влияют на значения критических сил и вид формы потери устойчивости. Поскольку система уравнений (25.3.1) решается при нулевой правой части, то форма потери устойчивости определяется лишь с точностью до множителя.

Зная форму потери устойчивости, можно воспользоваться энергетическим постпроцессором (см. разд. 26) и выяснить роль отдельных частей системы в процессе потери устойчивости. Для этого следует использовать операцию **Показать элементы с неположительной энергией**. Подчеркнем, что исследуется именно момент потери устойчивости, т. е. результат анализа не зависит от значения коэффициента запаса устойчивости. Таким образом, если увеличить интенсивность (но не вид) нагружения, увеличив все нагрузки, например, в N раз, то коэффициент запаса уменьшится в N раз, а форма потери устойчивости и энергетическая картина останутся прежними.

## 25.4. Свободные длины

Если в системе имеются стержневые элементы, то можно определить их свободные длины, т. е. длины таких же, но шарнирно опертых стержней, у которых критическая сила $N_{кр}$ совпадает с продольным усилием в стержне системы в момент потери устойчивости. Поскольку для шарнирно опертого по концам стержня длиной *l* по формуле Эйлера

$$N_{кр} = \pi^2 EJ / l^2,$$

коэффициент свободной длины (отношение свободной длины к длине стержня) будет равен

$$\mu = [(\pi^2 EJ/(N_{кр}\, l^2)]^{1/2}, \qquad (25.4.1)$$

где EJ — жесткости стержней в главных плоскостях инерции (для пространственной задачи — по две для каждого стержня).

Можно проиллюстрировать сказанное примером стержня переменного сечения (рис. 25.4-1), сжатого силами $F$ = 5T и $F$ = 10T. Расчет этой системы дает значение $k$ = 24,38.

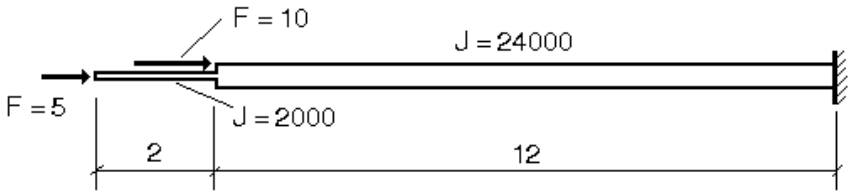



Рис. 25.4-1.

Свободная длина первого элемента $L_1$ = 25,45 м, а второго — $L_2$ = 12,72 м. Таким образом, коэффициент свободной длины у первого элемента $\mu_1$ = 25,45/12 = 2,12, а у второго элемента — $\mu_2$ = 12,72/2 = 6,36. Подсчет по указаниям СНиП II-23-81*[1] (см. приложение 6, таблица 67) дает значения

$n = (2000\times12)/(24000\times2) = 0{,}5$; $\beta = (10 + 5)/5 = 3$; $\alpha_1 = (2/12)\times[24000/(2000\times3)]^{1/2} = 0{,}333$.

Интерполируя по таблице 67, получим $\mu_2$ = 2,136 и $\mu_1$ = 2,136/0.333 = 6,236.

Из формулы (25.4.1) видно, что, если в системе имеются сильно и слабо нагруженные стержни одинакового сечения и одинаково закрепленные по концам (например, колонны многоэтажного здания, где на верхних этажах сжатие меньше, чем на нижних), то слабо нагруженные стержни имеют значительно большие свободные длины. Этот факт давно и хорошо известен и не раз служил предметом оживленных дискуссий. В этих спорах было выявлено, что проверки прочности и устойчивости таких «слишком длинных» стержней выполняются вполне корректно, но проверка предельных гибкостей не должна выполняться с такими длинами. В нормативную документацию последний вывод, к сожалению, не попал.

Заметим, что когда реальный стержень разбит на конечные элементы, то в результате расчета выдается свободная длина каждого из этих конечных элементов. Так, в рассмотренном выше примере, если разбить первый элемент, например, на четыре равные части, то в результате расчета свободная длина каждой из них получится равной 25,45 м, и проверки любой из этих частей выполнялись бы в одинаковых условиях.

## 25.5. Свободные длины и коэффициенты расчетной длины

Следует отметить, что использование вычисленных в комплексе **SCAD** свободных длин не позволяет **автоматически** назначить расчетные длины (или коэффициенты расчетной длины) в подсистемах расчета стальных и/или железобетонных конструкций (см. главы 19 и 20):

1. Свободная длина стержневого элемента зависит от загружения. При расчетах элементов стальных и железобетонных конструкций используются расчетные сочетания усилий, которые, во-первых, представляют собой комбинацию нескольких загружений, а, во-вторых, эта комбинация может быть различной в различных сечениях одного и того же элемента. Естественно, возникает проблема — какую свободную длину (от какого загружения или какой комбинации загружений) нужно использовать.
2. В подсистеме расчета элементов стальных конструкций комплекса **SCAD** используется понятие *конструктивный элемент* — последовательность конечных элементов. При анализе устойчивости вычисляются свободные длины каждого конечного элемента, а не конструктивного элемента.
3. Для определения гибкости по СНиП II-23-81* нужно знать расчетную длину. Если элемент растянут, то понятие свободной длины теряет смысл (и, естественно, не вычисляется). А для проверки ограничения по гибкости коэффициент расчетной длины нужен.
4. Вводя понятие свободной длины, разработчики СНиП (насколько нам известно) имели в виду не классическое определение строительной механики. Они предполагали, что конструкция является абсолютно жесткой в одной плоскости и считали, что расчетная длина характеризует устойчивость стержня при этом условии. В комплексе **SCAD** определяются свободные длины в двух плоскостях в предположении, что жесткости в обеих плоскостях конечны.

## 25.6. Строительные нормы и анализ устойчивости стержней

В комплексе **SCAD** момент потери устойчивости определяется для **строго прямолинейного, идеально упругого** стержня. При этом может оказаться, что некоторый стержень перенапряжен и уже потерял устойчивость при нагрузке, например, 80% от действующей.

Формулы норм предусматривают **упругопластическую работу стержня с начальными несовершенствами** (именно таким образом построена кривая коэффициентов продольного изгиба $\varphi(\bar{\lambda})$, приведенная в них). Согласно нормам может оказаться, что тот же стержень тоже

[1] Здесь и далее в этой главе мы ссылаемся на СНиП II-23-81*, но в равной степени все написанное относится и к СП 16.13330 и ДБН В.2.6-163:2010.

перенапряжен и потерял несущую способность при нагрузке, например, 76% от действующей. В этом случае 76% не очень сильно отличается от 80%. Но в других случаях разница может быть очень большой. Для объяснения этого явления можно воспользоваться примерной схемой, показанной на рисунке 25.6-1. Схемы такого типа можно найти в учебниках и справочниках по стальным конструкциям (см., например, [1, стр. 324, рис. 6.13] или [2, стр. 209-210]).

Из приведенных на рисунке графиков видно, что при малых гибкостях значения φ существенно различаются. Эту разницу можно увидеть, сравнив результаты, полученные с помощью программы **Кристалл**, которая реализует нижнюю кривую из рисунка 25.6-1 (согласно рекомендациям норм), и комплекса **SCAD**, где реализовано классическое решение Эйлера, которое дается формулой (25.4.1) при наличии шарниров на концах стержня.

В качестве примера рассмотрим расчетную модель, составленную из четырех стержневых конечных элементов кольцевого сечения. Критическая нагрузка такой сжатой стойки получается на 44% больше, чем это следует, например, из формулы 7 СНиП II-23-81*, поскольку коэффициент φ продольного изгиба приводится в СНиП с учетом дополнительного запаса, обусловленного возможными несовершенствами сжатого стержня. Чтобы убедиться в этом, рассмотрим, например, стержень с условной гибкостью $\bar{\lambda} > 4{,}5$, для которого в СНиП II-23-81* приведена формула 10: $\varphi = 332/[\bar{\lambda}^2(51-\bar{\lambda})]$. Сопоставим этот результат с решением Эйлера: $\sigma_{кр} = \pi^2 R_y/\bar{\lambda}^2$. Для этого определим коэффициент запаса, равный $\sigma_{кр}/(\varphi R_y)$. Он меняется от 1,38 при $\bar{\lambda} = 4{,}5$ до 1,10 при $\bar{\lambda} = 14$.

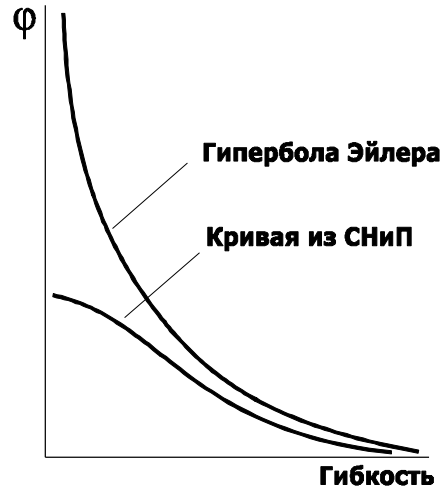



Рис. 25.6-1. *Зависимость* φ(λ)

Необходимо также отметить, что при малых гибкостях сказывается и еще одно различие — формулы норм учитывают пластическую стадию работы материала при потере устойчивости, в то время как комплекс дает решение задачи об устойчивости упругой системы.

В комплексе **SCAD** учет пластичности не реализован по следующим причинам:

- во-первых, неизвестно, что делать для элементов из материалов, отличных от предусматриваемых нормами;
- во-вторых, неизвестно, интересует пользователя, например, СНиП II-23-81* «Стальные конструкции» или СНиП 2.05.03-84 «Мосты и трубы». В последнем документе даже для стальных конструкций кривые φ(λ) — разные, поскольку различны предположения о величине начальных несовершенств.

Если вспомнить, что есть железобетонные, деревянные, пластмассовые и всяческие другие конструкции, то учет всех тонкостей, связанных с их проверкой по нормам, далеко уводит от *универсальной* расчетной программы.

## 25.7. Ввод данных

Ввод данных для проверки общей устойчивости системы выполняется в диалоговом окне (рис. 25.7-1), которое вызывается из раздела **Специальные исходные данные** (**Дерево проекта**). Для ввода данных необходимо выполнить такие операции:

- с помощью маркеров назначить необходимые режимы проверки — вычисление коэффициента запаса устойчивости, форм потери устойчивости и свободных длин стержневых элементов;
- в полях **Верхняя граница поиска** и **Точность вычислений** следует ввести соответствующие значения (по умолчанию приняты 2 и 0,01, которые можно уточнить и в процессе задания параметров управления расчетом (см. главу 11);

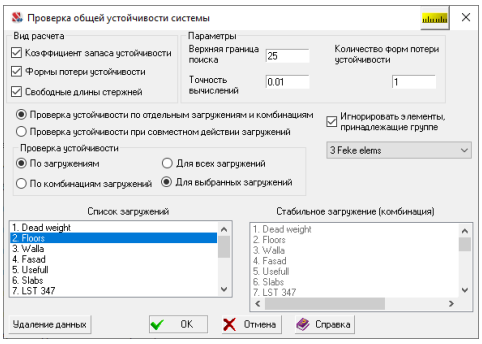



Рис. 25.7-1. *Диалоговое окно* **Проверка общей устойчивости системы**

– активировать опции, определяющие вид данных, для которых выполняется проверка устойчивости: по загружениям или по комбинациям загружений, для всех загружений (комбинаций) или только для указанных; в последнем случае выбор нужных данных выполняется в списке загружений (комбинаций);
– при необходимости активировать опцию **Проверка устойчивости при совместном действии загружений** и задать из появившегося списка **Стабильное загружение (комбинация)** необходимые данные.

Параметр **Точность вычислений** — задает критерий окончания итерационного процесса поиска коэффициента запаса устойчивости. При очень малых значениях этого параметра время расчета может существенно увеличиться. При неточном определении точки потери устойчивости условие равенства нулю упругого потенциала может выполняться с недопустимой погрешностью. Поэтому для анализа форм потери устойчивости в энергетическом процессоре необходимо увеличить точность вычислений.

Параметр **Верхняя граница поиска** — используется для ограничения интервала поиска коэффициента запаса устойчивости. Если его значение больше заданной верхней границы, то система считается устойчивой и в протоколе расчета (см. главу 13) выдается сообщение:

```
Коэффициент запаса устойчивости системы для загружения NNN больше верхней
границы поиска. Его значение не определено.
```

В этом случае нельзя воспользоваться формулой (25.4.1), и задание по вычислению свободных длин не будет выполняться, а последует выдача сообщения:

```
Для загружения NNN не могут быть вычислены свободные длины, т.к. не вычислен
коэффициент запаса устойчивости системы.
```

Параметр **Количество форм потери устойчивости** позволяет получить несколько форм потери устойчивости и более подробно изучить поведение конструкции, а в некоторых случаях использовать при принятии конструктивных решений (см. раздел 9.2 книги [3]).

Чтобы все же получить значения свободных длин, а также формы потери устойчивости, которые нельзя определить, если не вычислено значение $\lambda_{кр}$, следует задать увеличенное значение верхней границы поиска и повторить расчет.

Учет тангенциальных смещений в геометрической матрице жесткости оболочек и учет возможности потери устойчивости при изгибе стержней активируются соответствующими маркерами при назначении параметров управления расчетом (окно **Параметры расчета**) на странице **Устойчивость** (см. главу 11).

Существуют конструктивные решения, предусматривающие возможность работы системы с некоторыми элементами, потерявшими устойчивость. Типичным примером могут служить крестовые связи, у которых потерявший устойчивость сжатый раскос исключается из работы, и вся нагрузка воспринимается растянутым раскосом. Другим примером могут служить вводимые в систему фиктивные элементы, с помощью которых моделируется передача некоторых нагрузок. «Потеря устойчивости» таких стержней не представляет опасности для работы несущей конструкции. С целью беспрепятственного расчета конструкций, у которых имеются элементы, для которых сознательно допускается их выключение из силовой схемы при потере устойчивости, предусмотрена возможность создать группу таких элементов и указать (используя маркер **Игнорировать элементы, принадлежащие группе** и выбрав нужную группу в выпадающем списке), что все элементы этой группы не должны учитываться в проверке общей устойчивости системы.

Для удаления подготовленных данных и отказа от анализа устойчивости используется кнопка **Удаление данных**.

## 25.8. Особенности анализа для динамических нагружений

В случаях, когда выполняется проверка устойчивости по комбинациям загружений, среди которых имеются динамические, требуется проявить некоторую осторожность, связанную с двумя обстоятельствами:

- результаты динамического нагружения являются знакопеременными;
- в тех случаях, когда результаты динамического расчета сформированы как корень квадратный из суммы квадратов (ККСК) модальных вкладов, нарушены условия равновесия и геометрической связности узловых перемещений (об этом сказано, например, в п. 13.4).

Рассмотрим эти обстоятельства порознь.

Поскольку заранее не известно, какой знак результата динамического расчета является более опасным с точки зрения проверки устойчивости, то следует рассмотреть обе возможности. Так, например, если при расчете устойчивости рассматривается комбинация (L1)*1+(L2)*0.9+(L3)*0.7+(L4)*0.8, в которой нагружение (L3) является динамическим, то следует также выполнить проверку на комбинацию (L1)*1+(L2)*0.9+(L3)*(-0.7)+(L4)*0.8. При наличии нескольких динамических нагружений приходится перебирать все варианты знаков для их результатов.

Несовместность усилий, связанная с использованием ККСК (естественно, если учтена не только одна форма собственных колебаний), вообще говоря, никаких неприятностей не вызывает. Просто проверяется коэффициент запаса устойчивости при пропорциональном росте всех внутренних усилий, игнорируя тот факт, что эти усилия нарушают условия равновесия.

Но несовместность узловых перемещений приводит к тому, что имеющиеся в схеме абсолютно жесткие тела получают искажения (по сути они деформируются, что не соответствует их физической природе). Сложность состоит в том, что для этих элементов матрица $K_1(\lambda)$ не определяется внутренними силами или напряжениями, а вычисляется по значениям узловых перемещений, которые определяют изменение пространственной ориентации бесконечно жесткого конечного элемента (см. 9.5.1 в работе [3]). Несовместность узловых перемещений может привести к фатальной ошибке при вычислении $K_1(\lambda)$.

В связи с этим программа предусматривает обнуление матрицы $K_1(\lambda)$ при проверке устойчивости для комбинаций, содержащих динамическое нагружение с более чем одной учитываемой формой собственных колебаний. Об этом в протоколе расчета появляется соответствующее предупреждение.

## 25.9. Анализ результатов

При графическом анализе результатов можно проанализировать формы потери устойчивости в разделе **Перемещения** (см. рис. 12.1-5), где они в списке загружений идентифицируются буквой **S**. Все результаты можно получить с помощью **Генератора таблиц в текстовом формате** или **Документатора** (см. разд. 13.17).

## 25.10.Опрокидывание

Расчет на опрокидывание (потеря статического равновесия сооружением или любой его частью, рассматриваемых как жесткое тело) сводится к сравнению двух моментов – удерживающего и опрокидывающего. Эти моменты вычисляются относительно выбранного пользователем направления. Предполагается, что опрокидывание происходит путем поворота *вокруг* указанного направления. Реализованный в программе расчет основан на предположении, что постоянные загружения создают удерживающий момент, а появление опрокидывающего момента связано с действием временных нагрузок. Динамические загружения и комбинации загружений игнорируются.

## Исходные данные

Для того чтобы выполнить расчет на опрокидывание, следует задать дополнительную информацию: список фрагментов (в качестве фрагмента может быть вся схема). Для каждого фрагмента задается список направлений опрокидывания. Направление опрокидывания определяется координатами двух точек.

Дополнительная информация задается в разделе **Специальные исходные данные** (**Дерево проекта**) в диалоговом окне **Опрокидывание** (рис. 25.10-1), в котором рекомендуется следующий порядок работы:

- выбрать в списке групп элементов группу, которая будет использована как фрагмент для выполнения расчета на опрокидывание;
- нажать кнопку  , и тем самым загрузить в поле **Список элементов** номера элементов выбранной группы (список можно откорректировать непосредственно в поле загрузки);
- нажать кнопку **Новый фрагмент** (здесь имеется в виду, например, фундамент, возможность опрокидывания которого следует проанализировать);
- используя кнопки **Добавить** и **Удалить**, задать одно или несколько направлений возможного опрокидывания (направления задаются координатами двух различных точек на соответствующей прямой);
- с помощью кнопки **Записать фрагмент** сохранить введенные выше данные.

Если предусмотрен расчет нескольких фрагментов, то необходимо нажать кнопку **Новый фрагмент** и повторить все описанные выше действия.

Завершается ввод данных нажатием кнопки **OK** диалогового окна.

Набор элементов каждого фрагмента можно откорректировать непосредственно в поле **Список элементов**. Кроме того, предусмотрена возможность удаления ошибочно заданных участков. Для этого необходимо установить номер удаляемого фрагмента в выпадающем списке **Номер фрагмента** и нажать кнопку **Удалить фрагмент**. Если необходимо исключить из проекта данные для расчета на опрокидывание, следует нажать кнопку **Удалить данные**.

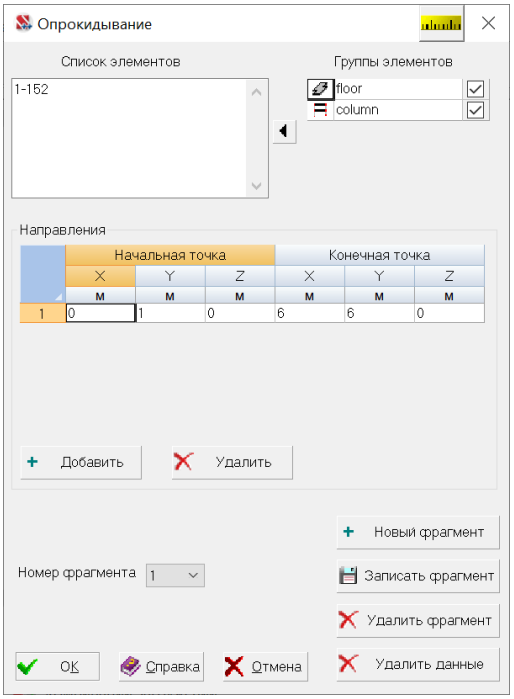



Рис. 25.10-1. *Диалоговое окно* **Опрокидывание**

Аналогичное диалоговое окно можно активировать также на закладке ***Специальные*** графического препроцессора (кнопка  ). В этом случае, если пользователь предварительно выполнил селекцию элементов, то в списке групп элементов появится пункт *Селектированные*.

### Расчет

Расчет может быть выполнен как в общем цикле решения задачи, так и самостоятельно в режиме постпроцессора. В первом случае исходные данные для расчета должны быть подготовлены до выполнения основного расчета. Во втором — их можно подготовить и после завершения основного расчета.

При расчете по СНиП, ДБН, СП, ... определяется невыгодная комбинация по правилам комбинирования расчетных нагрузок. При расчетах по Eurocode используется комбинирование по правилам EQU.

### Результаты

В постпроцессоре РСУ кнопка  позволяет получить следующее табличное представление результатов расчета:

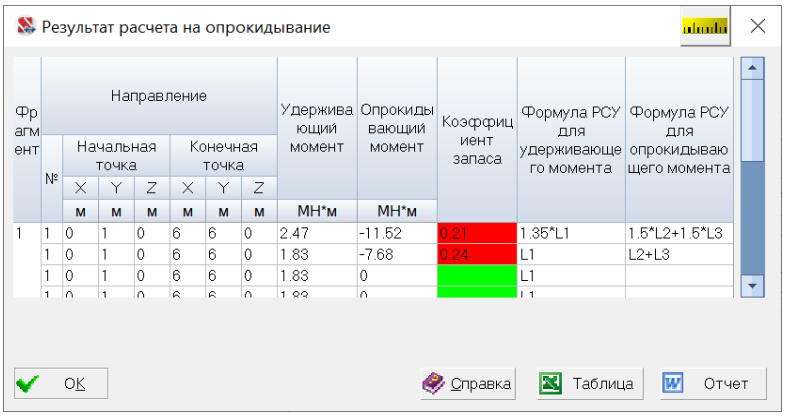



Рис. 25.10-2. *Диалоговое окно* **Результат расчета на опрокидывание**

Коэффициент запаса вычисляется по формуле $k=|M_r|/|M_a|$. Если $k < 1$, то происходит опрокидывание. В этом случае текст в ячейке *Коэффициент запаса* окрашен красным. При $1 \le k < 1.3$ ячейка окрашена в желтый цвет, а при $k \ge 1.3$ – в зеленый (1.3 – рекомендуемый нормами проектирования коэффициент запаса).

В таблице содержатся также формулы комбинаций для удерживающего и опрокидывающего моментов. Кнопки **Отчет** и **Таблица** создают соответствующие документы в форматах Word и Excel соответственно.

## 25.11.Литература к главе Анализ Устойчивости


1. Горев В.В., Уваров Б.Ю., Филиппов В.В. и др. Металлические конструкции. В 3 т. — Т. 1. Элементы стальных конструкций. — М.: Высш. шк., 1997.— 527 с.
2. Кузнецов В.В., Металлические конструкции. В 3 т. — Т. 1. Общая часть. (Справочник проектировщика) — М.: изд-во АСВ, 1998.— 576 с.
3. Перельмутер А.В., Сливкер В.И., Расчетные модели сооружений и возможности их анализа. — М.: Изд-во ДМК-Пресс, 2007. — 600 с.

# 26. Энергетический постпроцессор

Энергетический постпроцессор можно рассматривать как универсальное средство для получения отображения особенностей напряженно-деформированного состояния системы в виде картины распределения энергии деформаций.

Если энергетическая картина построена с учетом влияния геометрической матрицы жесткости, то появляется возможность относить отдельные части системы (вплоть до отдельных ее элементов) к одному из следующих двух классов: к классу *удерживающих* и к классу *толкающих* элементов (или частей) системы. Удерживающие элементы способствуют сохранению устойчивости равновесия системы, тогда как роль толкающих элементов отрицательна, поскольку именно они понуждают (подталкивают) механическую систему к потере ею устойчивости.

Проверка роли отдельных подсистем производится при подсчете значения энергии, накапливаемой в различных частях системы при ее деформировании по форме потери устойчивости. Для системы в целом эта энергия равна нулю, а те ее части, где энергия неположительная, относятся к толкающим, в то время как части системы с положительной энергией деформаций можно отнести к удерживающим.

На основании численных значений энергии толкающие элементы системы могут быть ранжированы по степени их «виновности» в наступлении критического состояния системы, поскольку вклад каждого из элементов системы в ее общий энергетический баланс может служить удобной количественной мерой его ответственности за устойчивость равновесия.

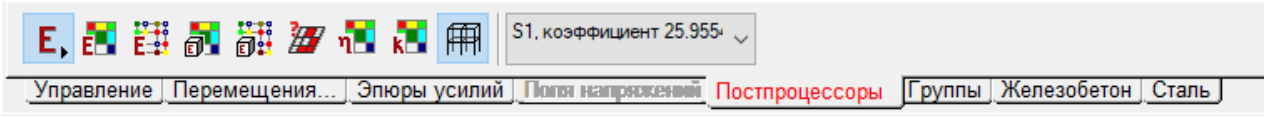



Рис. 26-1. *Инструментальная панель* **Постпроцессоры** *раздел* **Энергетический постпроцессор**

Режим анализа результатов работы энергетического постпроцессора активируется нажатием кнопки  инструментальной панели **Постпроцессоры**.

Инструментальная панель режима включает следующие кнопки:

 — отображение распределения энергии в виде цветовых полей;

 — отображение распределения энергии в виде цветовых маркеров;

 — отображение распределения удельной энергии в виде цветовых полей;

 — отображение распределения удельной энергии в виде цветовых маркеров;

 — отображение элементов с положительным, нулевым и отрицательным значениями энергии;

 — отображение распределения энергетической характеристики в виде цветовых полей;

 — отображение распределения коэффициентов чувствительности в виде цветовых полей;

 — отображение исходной расчетной схемы.

Результаты работы энергетического процессора отображаются в виде цветовых полей или маркеров. При этом распределение энергии в системе можно получить приведенным к объему конечного элемента или к единице объема (удельная энергия).

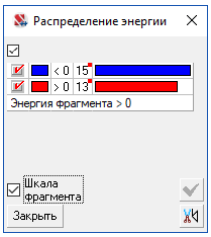



Рис. 26-2. *Цветовая шкала* **Распределение энергии**

В том случае, когда для выбранной формы потери устойчивости на фрагменте расчетной схемы выполняется построение цветовой шкалы распределения положительной и отрицательной энергии, то при активном маркере **Шкала фрагмента** выводится сообщение о знаке величины суммарной энергии данного фрагмента.

Это позволяет сделать вывод, является ли подсистема (выбранный фрагмент) *удерживающей*, *толкающей* или *нейтральной*[1].

Энергетические показатели системы имеют смысл не только при анализе устойчивости, но и для статических загружений и их комбинаций. В этом случае распределение удельной энергии характеризует энергетическую «загрузку» элементов расчетной схемы, а распределение энергии, приведенное ко всему объему КЭ, косвенно может служить показателем качества конечно-элементной сетки.

Предусмотрена также возможность вывода информации о распределении энергетической характеристики:

$$\eta = 1 - \lambda \frac{\langle L_g v, v \rangle}{\langle Lv, v \rangle},$$

где $L_g$ — геометрическая матрица жесткости элемента, $L$ — матрица жесткости элемента, $\lambda$ — коэффициент запаса устойчивости, $v$ — "перемещения" конечного элемента, полученные при решении задачи устойчивости (см. раздел 16.4.2 книги А.В. Перельмутер, В.И. Сливкер, *Устойчивость равновесия конструкций и родственные проблемы*, т. 2 — М.: Изд-во СКАД СОФТ, 2010. – 672 с.).

Кроме того, энергетический постпроцессор позволяет получить цветовую шкалу коэффициентов чувствительности, которые используются для оценки роли параметров системы (проектных переменных) при их относительно небольших изменениях, т.е. частных производных от некоторого интересующего нас результата расчета по проектной переменной. В данном случае рассматриваются коэффициенты чувствительности критического параметра (коэффициента запаса устойчивости) по отношению к жесткостям конечных элементов.

[1] См. Перельмутер А.В.,Сливкер В.И. Расчетные модели сооружений и возможности их анализа. — М., Изд-во СКАД СОФТ, АСВ, ДМК-Пресс, 2011. — 709 с.

# 27. Главные и эквивалентные напряжения

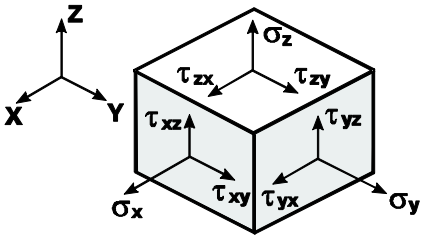



Рис. 27-1. *Компоненты напряжений*

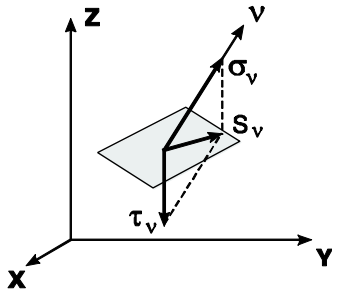



Рис. 27-2. *Напряжения на произвольной площадке*

Приведем некоторые основные положения теории напряжений, излагаемые обычно в курсе теории упругости или учебниках сопротивления материалов.

Если выделить из тела в окрестности некой точки (рис. 27-1) элементарный объем в виде бесконечно малого параллелепипеда, то действие на него окружающей среды можно заменить напряжениями, компоненты которых действуют на грани параллелепипеда.

В силу *закона парности* касательных напряжений

$$\tau_{xy} = \tau_{yx},\ \tau_{yz} = \tau_{zy},\ \tau_{zx} = \tau_{xz}. \qquad (27.1)$$

В общем случае в точке имеется только шесть независимых компонент напряжений, которые образуют симметричный *тензор напряжений*

$$T_\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{bmatrix}. \qquad (27.2)$$

На проходящей через ту же точку произвольно ориентированной площадке, нормаль которой ν имеет направляющие косинусы *l, m, n* с осями x, y, z, действует нормальное напряжение $\sigma_\nu$ и касательное напряжение $\tau_\nu$ (рис. 27-2) с равнодействующей $S_\nu$. Проекции этой равнодействующей на координатные оси $S_{\nu x}$, $S_{\nu y}$, $S_{\nu z}$ связаны с компонентами напряжений условиями равновесия (формула Коши):

$$\begin{aligned} S_{\nu x} &= \sigma_x l + \tau_{xy} m + \tau_{xz} n \\ S_{\nu y} &= \tau_{xy} l + \sigma_y m + \tau_{yz} n \\ S_{\nu z} &= \tau_{xz} l + \tau_{yz} m + \sigma_z n \end{aligned}. \qquad (27.3)$$

Существуют три таких взаимно перпендикулярных площадки, на которых касательные напряжения отсутствуют. На этих, т. н. *главных площадках,* действуют *главные напряжения* $\sigma_1$, $\sigma_2$ и $\sigma_3$. При этом имеется в виду, что $\sigma_1 \ge \sigma_2 \ge \sigma_3$. Известно также, что главные напряжения обладают экстремальными свойствами, а именно — на любой площадке результирующее напряжение $S_\nu \le \sigma_1$ и $S_\nu \ge \sigma_3$.

Направляющие косинусы $l_k$, $m_k$ и $n_k$ нормалей главных площадок $\nu_k$ определяются из решения системы уравнений:

$$\begin{cases} (\sigma_x - \sigma_k) l_k + \tau_{xy} m_k + \tau_{xz} n_k = 0; \\ \tau_{xy} l_k + (\sigma_y - \sigma_k) m_k + \tau_{yz} n_k = 0; \\ \tau_{xz} l_k + \tau_{yz} m_k + (\sigma_z - \sigma_k) n_k = 0; \end{cases} \qquad (27.4)$$

ненулевое решение которой существует при равенстве нулю ее определителя.

При этом $l_k^2 + m_k^2 + n_k^2 = 1$.

Из (27.4) следует, что главные напряжения $\sigma_k$ (k=1, 2, 3) являются корнями кубического уравнения

$$\det \begin{bmatrix} \sigma_x - \sigma & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y - \sigma & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z - \sigma \end{bmatrix} = 0. \qquad (27.5)$$

Уравнение (27.5) в развернутой форме имеет вид

$$\sigma^3 - I_1(T_\sigma)\sigma^2 - I_2(T_\sigma)\sigma - I_3(T_\sigma) = 0, \quad (27.6)$$

а его коэффициенты являются инвариантами (т. е. не зависят от выбора системы координат). Первый инвариант $I_1(T_\sigma) = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z$ равен утроенному среднему напряжению (гидростатическому давлению) $\sigma_0$.

Направление главных площадок можно определить не только девятью направляющими косинусами, а и тремя эйлеровыми углами (углом прецессии ψ, углом нутации θ и углом чистого вращения φ). С их помощью любая площадка, первоначально расположенная в плоскости, параллельной координатной плоскости (XOY, XOZ или YOZ), может быть установлена в произвольное положение.

Для характеристики напряженно-деформированного состояния (НДС) используется коэффициент Лоде-Надаи

$$\mu_0 = 2\frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} - 1,$$

принимающий значения $\mu_0 = 1$ при чистом сжатии, $\mu_0 = 0$ при чистом сдвиге, $\mu_0 = -1$ при чистом растяжении.

В принятых обозначениях при выводе результатов расчета тензор напряжений (27.2) в общем случае выглядит как

$$T_\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{bmatrix}. \quad (27.7)$$

## 27.1. Главные напряжения для конечных элементов различных типов

Каждый тип элемента обладает определенными особенностями напряженно-деформированного состояния (НДС), которое в свою очередь определяет особенности расположения главных площадок.

В зависимости от рассматриваемого типа элемента в каждой точке, где определены усилия (напряжения), вычисляются главные напряжения и углы, характеризующие положение главных площадок. Результаты расчета можно получить только в центре тяжести элемента (центре тяжести поперечного сечения тела вращения для осесимметричных элементов) или в центре тяжести и узлах.

### Пространственная задача теории упругости

Для решения пространственной задачи теории упругости предназначены объемные элементы и, как частный случай, осесимметричные элементы. Для них вычисляются:

- главные напряжения $\sigma_1$, $\sigma_2$ и $\sigma_3$;
- углы Эйлера —θ, ψ и φ;
- коэффициент Лоде-Надаи $\mu_0$;
- наклон главного напряжения $\sigma_1$ к оси $X_1$.

### Элементы балки-стенки

Для случая плоского НДС (балка-стенка) тензор напряжений имеет вид

$$T_\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_x & 0 & \tau_{xz} \\ 0 & 0 & 0 \\ \tau_{xz} & 0 & \sigma_z \end{bmatrix}, \quad (27.1.1)$$

здесь $\sigma_x$, $\sigma_z$ ,$\tau_{xz}$ — компоненты напряжений в срединной поверхности элемента, отнесенные к местным координатам $X_1OZ_1$. В этом случае могут быть вычислены только два главных напряжения по формуле

$$\sigma_{1,3} = \frac{\sigma_x + \sigma_z}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_z}{2}\right)^2 + \tau_{xz}^2}\ . \qquad (27.1.2)$$

Положение главных площадок характеризуется углом наклона главного напряжения $\sigma_1$ к оси $X_1$

$$\varphi = arctg\frac{\sigma_1 - \sigma_x}{\tau_{xz}}\ . \qquad (27.1.3)$$

Если $\tau_{xz} = 0$, то считается, что $\varphi = 0$, и в этом случае направления главных площадок совпадают с осями системы координат выдачи напряжений в элементе.

### Плиты и оболочки

Для плит на срединной поверхности вычисляются следующие усилия:

- моменты — $M_x$, $M_y$ и $M_{xy}$;
- перерезывающие силы — $Q_x$ и $Q_y$.

Для оболочек вычисляются также напряжения: $\sigma_x$ , $\sigma_y$ и $\tau_{xy}$. Тензор напряжений имеет вид:

$$T_\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & 0 \\ \tau_{xy} & \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \qquad (27.1.4)$$

так как касательные напряжения $\tau_{xz} = 1/5Q_x / h$ , $\tau_{yz} = 1/5Q_y / h$ не учитываются.

Для каждой точки, в которой вычислены усилия, главные напряжения определяются на нижней (Н), срединной (С) и верхней (В) поверхностях. При этом

$$\begin{aligned} \sigma_x^{B/H} &= \sigma_x \pm 6M_x/h^2, \\ \sigma_y^{B/H} &= \sigma_y \pm 6M_y/h^2, \\ \tau_{xy}^{B/H} &= \tau_{xy} \pm 6M_{xy}/h^2, \end{aligned} \qquad (27.1.5)$$

где $h$ — толщина элемента.

Тогда главные площадки для верхней и нижней поверхностей параллельны, а главные напряжения определяются по формуле

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}\ . \qquad (27.1.6)$$

Положение главных площадок характеризуется углом наклона главного напряжения $\sigma_1$ к оси $X_1$

$$\varphi = \text{arctg}\frac{\sigma_1 - \sigma_x}{\tau_{xy}}\ . \qquad (27.1.7)$$

Если $\tau_{xy} = 0$, то считается, что $\varphi = 0$, и в этом случае направления главных площадок совпадают с осями системы координат выдачи напряжений в элементе.

### Стержневые элементы

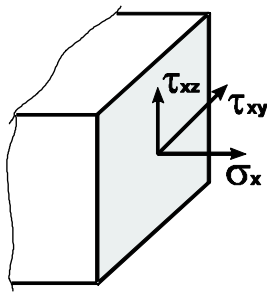



Рис. 27.1-1

Главные напряжения в стержневых элементах определяются по формуле

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2}\ . \qquad (27.1.8)$$

Здесь $\sigma_x$, $\tau_{xy}$ и $\tau_{xz}$ — соответственно, нормальное и касательные напряжения в характерных точках поперечного сечения стержня (рис. 27.1-1).

Главные напряжения вычисляются для стержневых элементов, сечения которых заданы параметрически или выбраны из сортамента металлопроката. На рис. 27.1-2 и рис. 27.1-3 изображены характерные точки сечений, для которых производятся вычисления.

В точках, которые не располагаются на материальной части поперечного сечения (например, точка 9 для коробчатого сечения), значения главных напряжений не вычисляются.

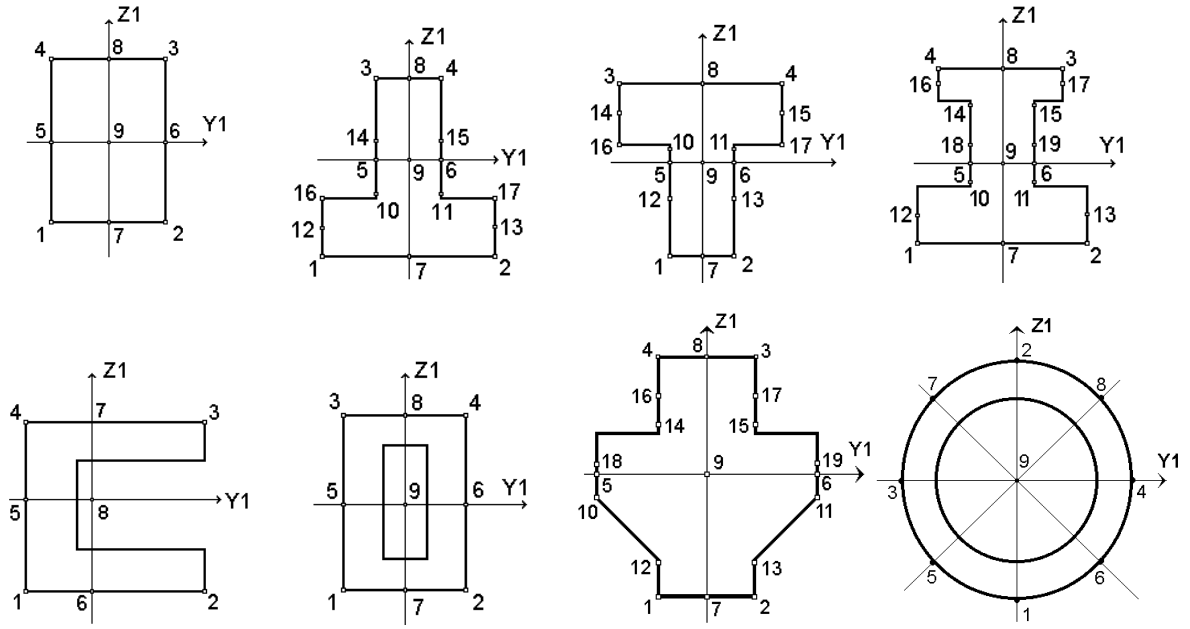



Рис. 27.1-2. *Параметрические сечения*

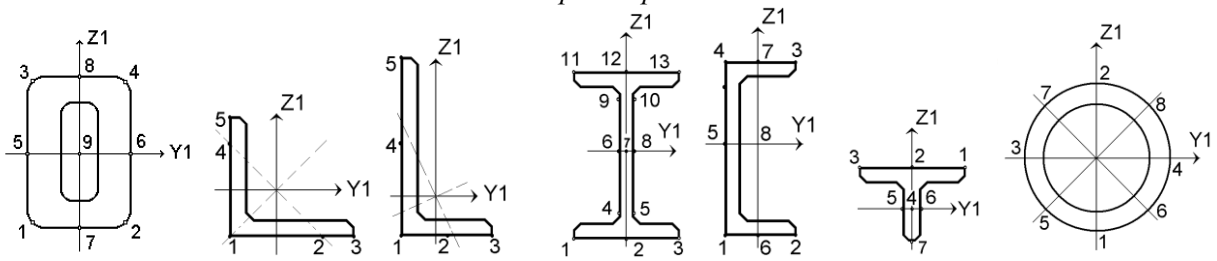



Рис. 27.1-3. *Прокатные профили (цифрами обозначены номера характерных точек)*

## 27.2. Вычисление эквивалентных напряжений

При простых видах деформации, в частности, при одноосном напряженном состоянии, об опасности действующих напряжений судят, сопоставляя их с экспериментально устанавливаемой величиной (с пределом текучести для пластических материалов или с временным сопротивлением для хрупких тел). Для сложного напряженного состояния, характеризующегося главными напряжениями $\sigma_1$, $\sigma_2$ и $\sigma_3$, обычно используется некоторая гипотеза (теория прочности) о преимущественном влиянии на прочность материала того или иного фактора. При этом предусматривается возможность сопоставления некоторого эквивалентного напряжения $\sigma_e$ с пределом $\sigma_0^+$, который соответствует простому одноосному растяжению. Условие невозникновения предельного состояния в материале записывается в виде

$$\sigma_e = f\left(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, k_1, ..., k_n\right) \le \sigma_0^+ ,$$

где $k_1,...,k_n$ — некоторые константы материала, которые могут и отсутствовать.

Приведем обозначения некоторых используемых констант:

$\sigma_0 = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$ — среднее напряжение (гидростатическое давление);

$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{2}\left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2\right]}$ — интенсивность напряжений;

$\sigma_0^+$, $\sigma_0^-$, $\tau_0$ — предельные напряжения материала, соответственно, при одноосном растяжении, одноосном сжатии и чистом сдвиге;

$\chi = \sigma_0^+ / \sigma_0^-$; $\varphi = \sigma_0^+ / \tau_0$; $\psi = \sigma_0^- / \tau_0$; $\lambda = 1/\sigma_0^-$.

Иногда удобнее сопоставлять эквивалентное напряжение с пределом $\sigma_0^-$, соответствующим сопротивлению образца материала при простом одноосном сжатии. Соответствующее эквивалентное напряжение обозначается как $\sigma_S$.

В комплексе реализовано четыре теории прочности, сведения о которых приведены в таблице 27.2-1. Все они относятся к изотропным материалам и условиям статического нагружения, когда история поведения конструкции не сказывается на формулировке условий разрушения.

**Таблица 27.2-1**

| № п/п | Теории прочности | Выражение для вычисления эквивалентного напряжения растяжения $\sigma_e$ и сжатия $\sigma_s$ | Сфера применения |
|---|---|---|---|
| 1 | Теория максимальных нормальных напряжений | $\sigma_e = \sigma_1$<br>$\sigma_s = \sigma_3$ | Для хрупких однородных материалов (керамика, стекло) |
| 2 | Теория наибольших линейных деформаций | $\sigma_e = \sigma_1 - \mu\,(\sigma_2+\sigma_3)$<br>$\sigma_s = \sigma_3 - \mu\,(\sigma_1+\sigma_2)$ | Для хрупких материалов при простом сжатии |
| 3 | Теория наибольших касательных напряжений | $\sigma_e = \sigma_1 - \sigma_3$<br>$\sigma_s = \sigma_e$ | Для пластических материалов с малым упрочнением, для которых характерно появление локальных пластических деформаций в виде линий скольжения (отпущенная сталь) |
| 4 | Теория октаэдрических касательных напряжений или удельной энергии формоизменения | $\sigma_e = \sigma_i = \left\{ \frac{1}{2}\left[ (\sigma_1-\sigma_2)^2 + (\sigma_2-\sigma_3)^2 + (\sigma_3-\sigma_1)^2 \right] \right\}^{\frac{1}{2}}$<br>$\sigma_s = \sigma_e$ | Для большинства пластических материалов (сталь, медь, никель) |

## 27.3. Подготовка данных для расчета главных и эквивалентных напряжений

Исходные данные для расчета главных и эквивалентных напряжений готовятся в одноименном диалоговом окне (рис. 27.3-1), которое вызывается из раздела **Специальные исходные данные** (**Дерево проекта**). Расчет можно выполнить как для отдельных загружений, так и для их комбинаций.

Вид расчета назначается путем активации маркеров, расположенных в верхней части диалогового окна.

С помощью маркеров группы **Теория прочности** выбирается теория, в соответствии с которой вычисляются эквивалентные напряжения.

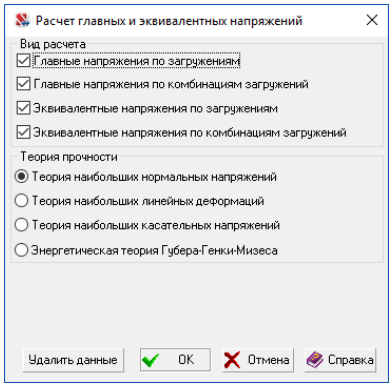
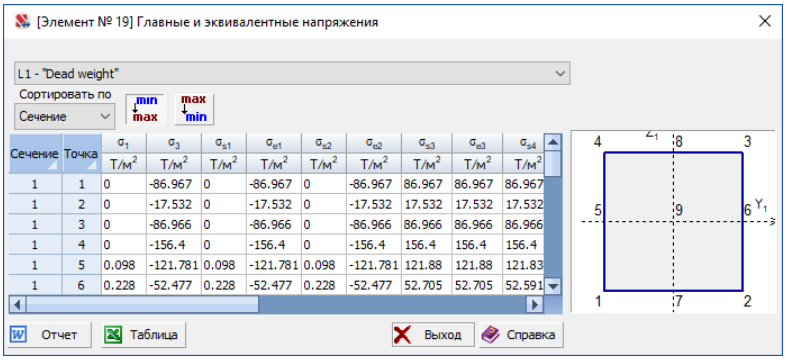



Рис. 27.3-1. *Диалоговое окно*
**Расчет главных и эквивалентных напряжений**

По нажатию кнопки **Удалить данные** информация, необходимая для расчета главных и эквивалентных напряжений, удаляется из исходных данных, и расчет выполняться не будет.

**В комплексе SCAD не выполняется вычисление главных и эквивалентных напряжений по расчетным сочетаниям усилий. Поскольку выбор расчетных сочетаний основан на поиске экстремального значения какой-либо одной компоненты напряженного состояния, то его не удается связать с поиском главных и эквивалентных напряжений, которые вычисляются с использованием всех компонент напряженного состояния.**

Результаты расчета можно вывести на печать в табличной форме из раздела **Печать таблиц** (**Дерево проекта**) или в **Документаторе** (см. главу 13). Кроме того, в диалоговом окне **Информация об элементе** предусмотрена возможность отображения главных и эквивалентных напряжений в табличной форме (рис. 27.3-2).




| Сечение | Точка | $\sigma_1$ Т/м$^2$ | $\sigma_3$ Т/м$^2$ | $\sigma_{s1}$ Т/м$^2$ | $\sigma_{e1}$ Т/м$^2$ | $\sigma_{s2}$ Т/м$^2$ | $\sigma_{e2}$ Т/м$^2$ | $\sigma_{s3}$ Т/м$^2$ | $\sigma_{e3}$ Т/м$^2$ | $\sigma_{s4}$ Т/м$^2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 0 | -86.967 | 0 | -86.967 | 0 | -86.967 | 86.967 | 86.967 | 86.967 |
| 1 | 2 | 0 | -17.532 | 0 | -17.532 | 0 | -17.532 | 17.532 | 17.532 | 17.532 |
| 1 | 3 | 0 | -86.966 | 0 | -86.966 | 0 | -86.966 | 86.966 | 86.966 | 86.966 |
| 1 | 4 | 0 | -156.4 | 0 | -156.4 | 0 | -156.4 | 156.4 | 156.4 | 156.4 |
| 1 | 5 | 0.098 | -121.781 | 0.098 | -121.781 | 0.098 | -121.781 | 121.88 | 121.88 | 121.83 |
| 1 | 6 | 0.228 | -52.477 | 0.228 | -52.477 | 0.228 | -52.477 | 52.705 | 52.705 | 52.591 |

Рис. 27.3-2. *Таблица главных и эквивалентных напряжений в выбранном элементе*

## 27.4. Графическое отображение результатов расчета главных и эквивалентных напряжений

Для графического отображения результатов расчета главных и эквивалентных напряжений используется режим **Анализ главных и эквивалентных напряжений** в разделе **Постпроцессоры** инструментальной панели. Для пластинчатых элементов в режиме графического анализа результатов предусмотрено построение изолиний и изополей главных и эквивалентных напряжений, а также отображение направлений одной из главных площадок. Для объемных конечных элементов предусмотрено отображение изоповерхностей напряжений. В случае стержней также можно получить эпюры или цветовую шкалу эпюр (27.4-2).

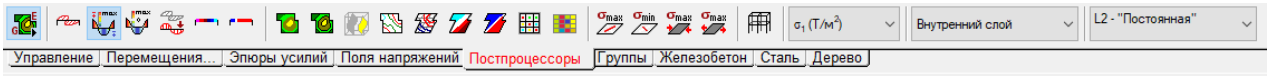



Рис. 27.4-1. *Инструментальная панель, режим* **Анализ главных и эквивалентных напряжений**

Инструментальная панель режима включает следующие функции:

— отображение эпюр главных/эквивалентных напряжений в стержнях;

— смена оси отображения эпюр;

— цветовое отображение значений главных/эквивалентных напряжений в стержнях;

— цветовое отображение значений главных/эквивалентных напряжений в стержнях с выделенным значением;

— цветовое отображение эпюр главных/эквивалентных напряжений;

— цветовое отображение эпюр главных/эквивалентных напряжений с выделенным значением;

— отображение результатов в виде изолиний;

 — отображение результатов в виде изополей;

 — отображение результатов в виде изополей и изолиний;

 — вывод изоповерхностей;

 — отображение изолиний с заданным шагом;

 — отображение изополей с заданным шагом;

 — отображение изополей с выделенным значением;

 — цветовое отображение напряжений;

 — цветовая индикация напряжений в центре элементов;

 — отображение направления главных площадок с максимальным напряжением;

 — отображение направления главных площадок с минимальным напряжением;

 — отображение направления главных площадок с максимальным сжимающим напряжением;

 — отображение направления главных площадок с максимальным растягивающим напряжением;

 — отображение исходного состояния схемы.

Кроме того, панель включает три списка: выбор вида напряжения; назначение слоя, в котором анализируются выбранные напряжения пластин; установка загружения или комбинации загружений.

При определении вида выводимой информации приняты следующие условные обозначения:

$\sigma_1$, $\sigma_2$, $\sigma_3$ — главные напряжения;

$\sigma_{E1}$ — эквивалентное напряжение (приведенное к эквивалентному растяжению) по первой теории прочности;

$\sigma_{S1}$ — эквивалентное напряжение (приведенное к эквивалентному сжатию) по первой теории прочности;

$\sigma_{E2}$, $\sigma_{E3}$, $\sigma_{E4}$ — эквивалентные напряжения (приведенные к эквивалентному растяжению) по 2 – 4 теориям прочности;

$\sigma_{S2}$, $\sigma_{S3}$, $\sigma_{S4}$ — эквивалентные напряжения (приведенные к эквивалентному сжатию) по 2 – 4 теориям прочности.

При этом используется следующая нумерация теорий прочности:

1 — теория наибольших нормальных напряжений;

2 — теория наибольших линейных деформаций;

3 — теория наибольших касательных напряжений;

4 — энергетическая теория Губера-Хенки-Мизеса.

Список слоев включает внутренний слой, средний слой, внешний слой и суммарные. Если выбран пункт ***суммарные***, то список выводимой информации следующий:

$\Sigma\sigma_{max}$ — максимальное главное усилие;

$\Sigma\sigma_{min}$ — минимальное главное усилие;

$\Sigma M_{max}$ — максимальный главный момент;

$\Sigma M_{min}$ — минимальный главный момент.

Управление отображением выполняется с помощью кнопок инструментальной панели (рис. 27.4-1) полностью аналогично выводу усилий и напряжений, поэтому ниже дано описание только для операций, которые не имеют аналогов или имеют определенные отличия.

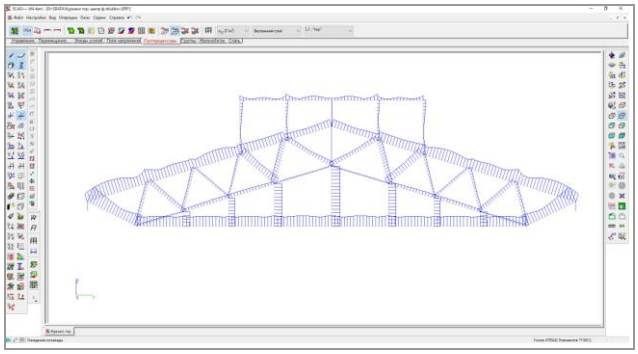
## Цветовое отображение главных/эквивалентных напряжений в стержнях

Для стержневых элементов программа вычисляет главные/эквивалентные напряжения в целом ряде точек характерных для каждой формы поперечного сечения. При отображении эпюр (режим ) или цветовом отображении эпюр (режимы ) при выборе напряжений $\sigma_1$, $\sigma_{s1}$, $\sigma_{s2}$, $\sigma_{s3}$, $\sigma_{s4}$ рисуется эпюра минимального по всем точкам значения; для напряжений $\sigma_3$, $\sigma_{e1}$, $\sigma_{e2}$, $\sigma_{e3}$, $\sigma_{e4}$ рисуется эпюра максимального по всем точкам значения.

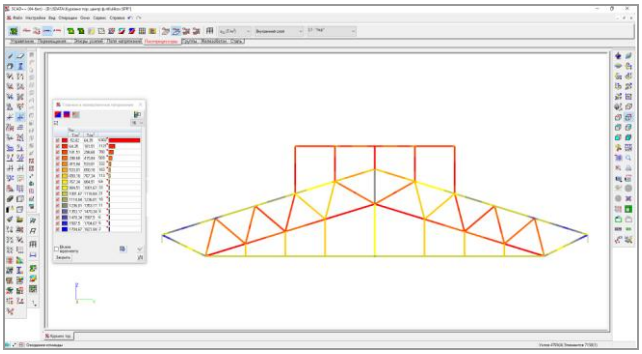
Операции (**Цветовое отображение эпюр главных/эквивалентных напряжений**) и (**Цветовое отображение эпюр главных/эквивалентных напряжений с выделенным значением**) аналогичны операциям , , но они обеспечивает градиентную окраску *эпюр*:



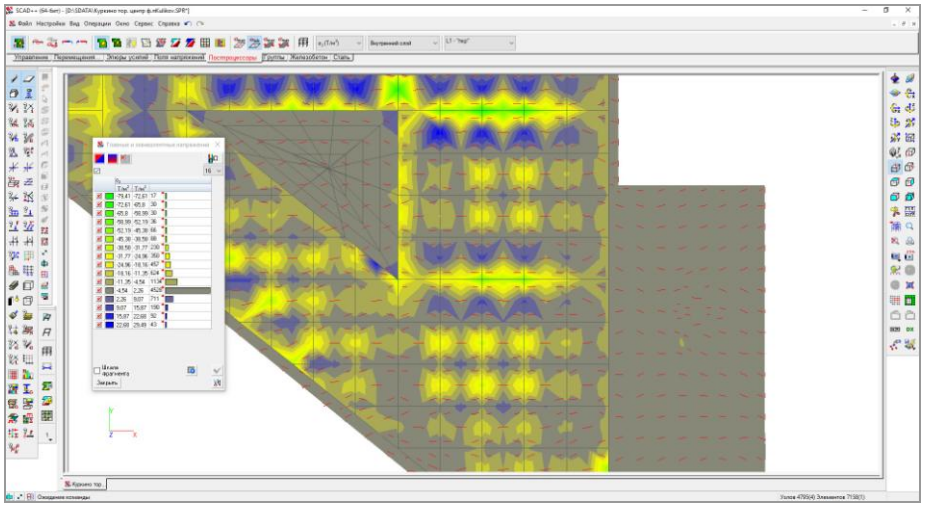
Кнопка позволяет изменить ось отображения эпюр и тем самым выбрать вариант отображения с "лучшей видимостью" (см. рис. 27.4-2).



*Эпюры*



*Цветовое отображение эпюр*



*Изополя + направление главных площадок*

Рис. 27.4-2. *Графическое отображение главных/эквивалентных напряжений*

## Отображения направлений главных площадок



Для пластинчатых элементов направление выбранной главной площадки отображается в виде отрезка с центром в геометрическом центре конечного элемента. Предусмотрено 4 режима отрисовки главных площадок на пластинчатых элементах:

 — рисуется площадка соответствующая напряжению $\sigma_{1;}$

 — рисуется площадка соответствующая напряжению $\sigma_{3;}$

 — если $\sigma_3<0$, то рисуется площадка соответствующая напряжению $\sigma_{3;}$

 — если $\sigma_1>0$, то рисуется площадка соответствующая напряжению $\sigma_{1.}$

# 28. Нелинейные расчеты в системе SCAD

## 28.1. Общие сведения

Задачи расчета несущих конструкций, ориентированные на уточненное предсказание особенностей поведения системы на всех этапах ее работы, включая и этапы, предшествующие разрушению, чаще всего не могут быть решены методами линейной строительной механики. Отклонение от закона Гука (*физическая нелинейность*), отказ от рассмотрения условий равновесия в геометрических терминах недеформированного состояния (*геометрическая нелинейность*), учет возможного изменения расчетной схемы в процессе деформирования (*конструктивная нелинейность*) составляют обычный «набор нелинейностей», к которому апеллирует учебная литература [3, 6] и большинство программных разработок. К ним следует добавить еще нелинейность, связанную с накоплением напряжений и деформаций в процессе изменения конструкции при ее создании (*генетическую нелинейность*).

Не останавливаясь на подробностях, сформулируем хотя бы некоторые предостережения общего плана по проблематике нелинейного расчета. Часть из них (далеко не все) представлены в таблице 28.1-1.

**Таблица 28.1-1**

| Особенность | Линейные задачи | Нелинейные задачи |
|---|---|---|
| Зависимость смещений от нагрузки | Смещения линейно зависят от приложенной нагрузки | Зависимость смещения от нагрузки нелинейная |
| Связь между напряжением и деформацией | Принимается линейная зависимость между напряжением и деформацией | В задачах, где рассматривается физическая нелинейность, зависимость «напряжение-деформация» может являться нелинейной функцией напряжения или деформации |
| Величина смещения | Изменение в геометрии благодаря смещению считается малым, и игнорируются при проверке равновесия | Смещения могут быть не малыми, для проверки равновесия необходимо использовать деформированное состояние |
| Обратимость | Все деформации полностью обратимы и исчезают при разгрузке системы | После снятия нагрузки состояние системы может отличаться от исходного |
| Граничные условия | Граничные условия в течение расчета остаются неизменными | Граничные условия могут изменяться, например, меняются площадки контакта |
| Последовательность приложения нагрузок | Последовательность приложения нагрузок не важна, заключительное состояние от нее не зависит | Состояние конструкции может зависеть от последовательности приложения нагрузок |
| Использование результатов | Результаты расчета на разные нагрузки допускают сложение или умножение на некоторые коэффициенты, с целью объединения расчетных состояний | Разложение задачи на составляющие и последующее объединение результатов невозможно |
| Исходное напряженно-деформированное состояние | Исходное напряженно-деформированное состояние несущественно | Исходное напряженно-деформированное состояние обычно требуется задать, в особенности для нелинейности, связанной с поведением материала |

Следует быть осторожным в употреблении понятия «физическая нелинейность», которое зачастую отождествляется с пластическим поведением материала. Но при этом во многих программах рассматривается случай, когда линейная зависимость между напряжениями и деформациями заменена некоторой нелинейной функцией, одинаковой для нагружения и разгрузки. Такие нелинейно-упругие материалы в природе почти не встречаются. Как правило, пластический материал после разгрузки имеет остаточные деформации.

В комплексе **SCAD** предусмотрен расчет геометрически нелинейных систем, вантовых конструкций, задач с односторонними связями и физически нелинейных систем.

## 28.2. Геометрическая нелинейность

Геометрически нелинейная работа упругой системы связана с необходимостью учитывать изменение геометрии системы при ее деформации под нагрузкой. При этом, в принципе, могут рассматриваться геометрические искажения различной величины, но в комплексе **SCAD** предусматривается возможность учета только, так называемого, «приближения Кармана», когда предполагается, что квадраты углов поворота элементов рассматриваемой расчетной схемы являются величинами того же порядка малости, что и относительные удлинения в материале, которые в свою очередь считаются малыми по сравнению с единицей. Более детально этот вопрос рассмотрен в разд. 3.5 работы [7].

Рассматривается взаимодействие между изгибными эффектами и продольными усилиями (явление продольного изгиба в стержнях) когда, например, для гибкой пластины толщиной $h$ вместо линейного уравнения

$$\frac{D}{h}\nabla^2\nabla^2 w = \frac{q}{h}, \tag{28.2.1}$$

используются уравнения

$$\begin{aligned} &\frac{D}{h}\nabla^2\nabla^2 w = \frac{\partial^2\Phi}{\partial y^2}\cdot\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\Phi}{\partial x^2}\cdot\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - 2\frac{\partial^2\Phi}{\partial x\partial y}\cdot\frac{\partial^2 w}{\partial x\partial y} + \frac{q}{h}; \\ &\nabla^2\nabla^2\Phi = E\left[\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x\partial y}\right)^2 - \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\cdot\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right] \end{aligned} \tag{28.2.2}$$

относительно функции прогибов $w(x,y)$ и функции напряжений $\Phi(x,y)$, через которую определяются мембранные усилия как

$$\sigma_x = \frac{\partial^2\Phi}{\partial y^2}; \quad \sigma_y = \frac{\partial^2\Phi}{\partial x^2}; \quad \tau_{xy} = \frac{\partial^2\Phi}{\partial x\partial y}.$$

В (28.2.1) и (28.2.2) использовано обозначение дифференциального оператора

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2},$$

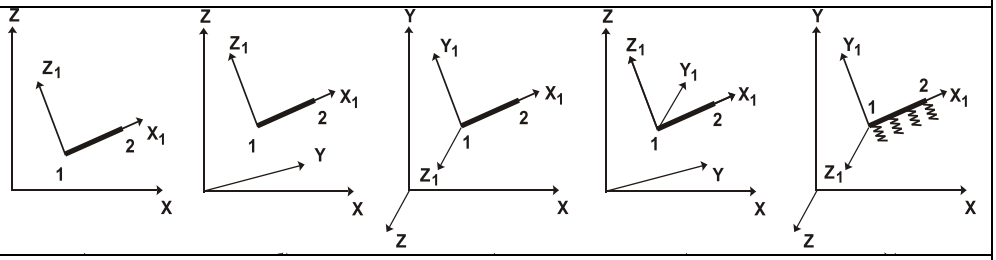
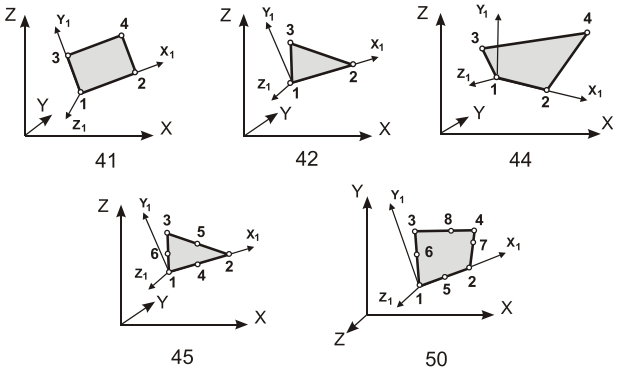
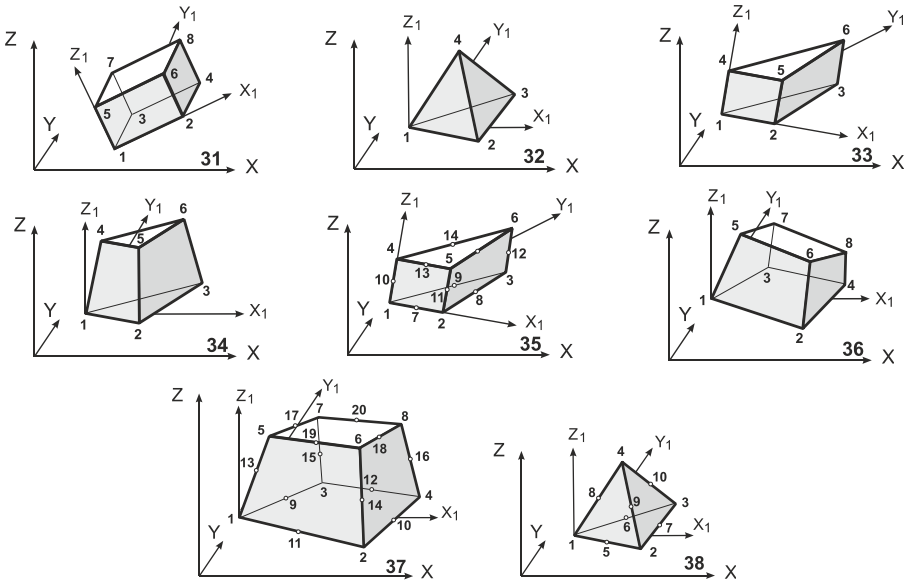
$q$ — величина нагрузки.

Геометрически нелинейные эффекты можно учесть, если в схеме используются конечные элементы, представленные в таблице 28.2-1.

Элементы 301–310, 601-610 являются аналогами стержневых элементов, 341–350, 391-399, 641-650, 691-699, 741-750, 791-799 — элементов оболочки, а 331-338 — объемных элементов и подробно рассмотрены в главе 3. У них полностью совпадает задание исходной информации, нагрузок. Совпадают вычисляемые усилия и правила знаков для них (см. разд. 13.5).

Для того чтобы изменить тип линейного элемента на нелинейный для учета геометрической нелинейности, следует активировать операцию **Назначение элементов для учета нелинейности** в разделе **Назначение** инструментальной панели, выбрать на схеме соответствующие элементы и нажать кнопку **ОК**. Аналогичный результат можно получить и с использованием операции **Назначение типа конечных элементов**. Перед тем, как в соответствующем диалоговом окне (рис. 28.2-1) выбрать тип оболочечного или стержневого элемента (линейный), следует активировать маркер **Учет геометрической нелинейности**. Присвоение элементам выбранного типа выполняется традиционным способом.

**Таблица 28.2-1**

| Тип КЭ | Линейный аналог | Описание |
|---|---|---|
| 301-310<br>601-610 | 1-10<br>101-110 |  |
| 341-350<br>391-399<br>641-650<br>691-699<br>741-750<br>791-799 | 41-50<br>91-99<br>141-150<br>191-199<br>541-550<br>591-599 |  |
| 331-338 | 31-38 |  |

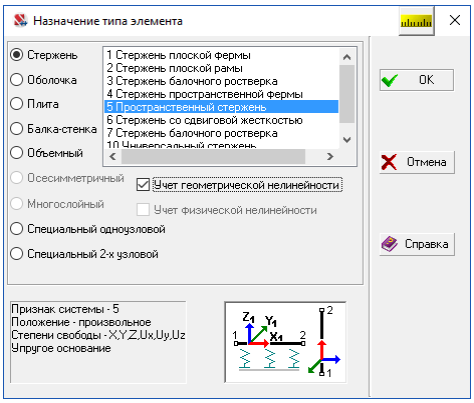



Рис. 28.2-1. *Диалоговое окно* **Назначение типа элемента**

## Вантовые элементы

Расчетной моделью вантового элемента является гибкая нить с малой стрелкой провисания, которая в исходном состоянии, характеризуемом температурой $T_0$ и натяжением $H_0$, нагружена некоторой поперечной нагрузкой $q_0(x)$, и у которой при удлинении хорды на $\Delta$ и изменении поперечной нагрузки до величины $q(x)$, а температуры до $T$ натяжение становится равным $H$.

Уравнение, связывающее эти величины, для пологих нитей имеет вид

$$\Delta = \frac{(H-H_0)L}{EA} - \frac{D}{2H^2} + \frac{D_0}{2H_0^2} + \alpha(T-T_0)L\,, \qquad (28.2.1)$$

где

$$D = \int_0^L Q^2(x)dx\,, \quad D_0 = \int_0^L Q_0^2(x)dx\,,$$

$Q(x)$ — поперечная сила, возникающая в шарнирно опертой балке пролета $L$ от действия нагрузки $q(x)$, направленной поперек хорды вантового элемента;

$Q_0(x)$— то же, но от нагрузки $q_0(x)$;

$\alpha$ — коэффициент температурного расширения;

$E$ — модуль упругости материала нити;

$A$ — площадь поперечного сечения нити.

В безразмерных переменных $\delta = \Delta/L$ , $\delta_0 = \Delta_0/L$ , $t = H/(EA)$, при обозначениях

$$\Delta_0 = \frac{H_0 L}{EA} - \alpha(T-T_0)L - \frac{D_0}{2H_0^2}\ ,\quad K = \frac{D}{2L(EA)^2}$$

уравнение (28.2.1) приобретает форму

$$\delta = t - \frac{K}{t^2} - \delta_0\,. \qquad (28.2.2)$$

Диаграмма зависимости $\delta$ от $t$ при $\delta_0 = 0$ представлена на рис. 28.2-2, величину $\delta_0$ легко учесть смещением начала координат. Из рисунка видно, что с уменьшением $K$ кривая $t = t(\delta)$ прижимается к своим асимптотам, в роли которых выступают ось абсцисс при $\delta < 0$ и прямая с тангенсом угла наклона $EA/L$ при положительных $\delta$. Мгновенная податливость вантового элемента в окрестности некоторого напряженного состояния, характеризуемого натяжением $H$, легко определяется дифференцированием уравнения состояния (28.2.1):

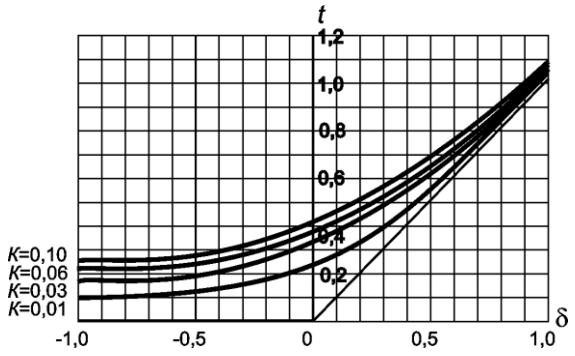



Рис. 28.2-2. *Безразмерная зависимость между натяжением и увеличением хорды*

$$\frac{d\Delta}{dH} = \frac{L}{EA} + \frac{D}{H^3}\,. \qquad (28.2.3)$$

При расчете вантовых систем важно правильно задать отсчетное состояние, которое характеризуется начальными значениями поперечных нагрузок на вантовых элементах $q_0$ (как правило, это перпендикулярная к хорде вантового элемента составляющая нагрузки от собственного веса ванты) и значениями натяжений $H_0 \ge 0$.

Основная сложность состоит в том, что все значения $H_0$ должны соответствовать равновесному состоянию системы, в котором предварительные напряжения создают некоторую картину внутренних сил, соответствующую начальной внешней нагрузке $q_0$, которая может и отсутствовать. Обычно существует множество возможных равновесных состояний системы, каждое из которых отвечает своему распределению усилий предварительного напряжения в вантах $H_{0,i}$ ($i = 1,\ldots,m$), где $m$ — количество вант в системе. В связи с этим при проектировании вантовых конструкций перед инженером стоит задача выбора рационального начального напряженного состояния из множества допустимых, основываясь на некоторых критериях оптимальности и конструктивных ограни-

чениях. Сами эти критерии и ограничения могут варьироваться в зависимости от конкретной проектной задачи.

Для облегчения этих расчетов при работе с вантовыми элементами в комплексе **SCAD** предусмотрена следующая операция — ванты удаляются, и усилия преднапряжения прикладываются к оставшейся части конструкции. Может оказаться, что после удаления вант система окажется изменяемой, что характерно для мачт с шарнирным опиранием ствола на фундамент. Чтобы уйти от этой неприятности иногда приходится устанавливать дополнительные упругие связи с настолько малой жесткостью, что их влиянием на общее напряженно-деформированное состояние можно пренебречь.

Задание параметров вантового элемента выполняется после нажатия кнопки **Ввод вантовых элементов**  инструментальной панели **Специальные элементы** (см. разд. 6.4). При нажатии этой кнопки открывается окно **Жесткость стержневых элементов** (рис. 28.2-3). Если выбран способ задания, отличающийся от численно-параметрического описания, то единственное отличие от задания жесткостных характеристик стержневых элементов заключается в обязательном указании величины преднапряжения. При численном описании диалоговое окно имеет вид, представленный на рис. 28.2-4.

При назначении жесткостных характеристик путем выбора сечения из сортамента металлопроката только для вантовых элементов доступен **Сортамент стальных оцинкованных канатов**.



При задании жесткостных характеристик вантовых элементов с использованием сортамента стальных оцинкованных канатов ***модуль упругости стали назначается в соответствии с рекомендациями соответствующих норм*** и может быть изменен пользователем.

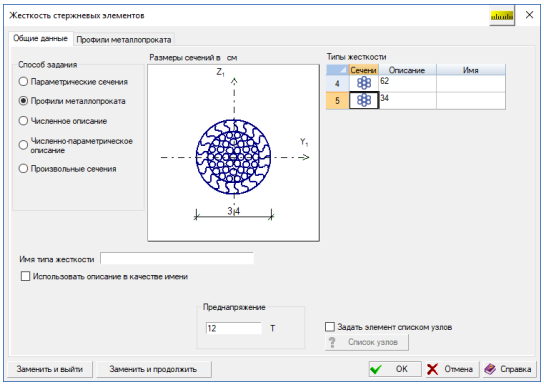



Рис. 28.2-3. *Диалоговое окно* **Жесткость стержневых элементов** *страница* **Общие данные**

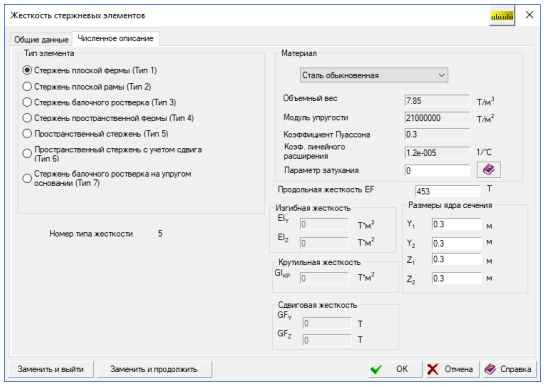



Рис. 28.2-4. *Диалоговое окно* **Жесткость стержневых элементов** *страница* **Численное описание** вантового элемента

Кроме выполнения статических расчетов требуется и проведение расчетов на свободные колебания, поскольку в противном случае невозможно определить пульсационную составляющую ветровой нагрузки, выполнить расчет на сейсмические воздействия и т. д. Вместе с тем, спектральный анализ системы (определение частот и форм ее свободных колебаний) имеет смысл только в линейной постановке. В нелинейных же задачах можно говорить о разложении движения системы по формам свободных колебаний в окрестности изучаемого равновесного положения при линеаризации поведения системы в этой окрестности. Определение напряженно-деформированного состояния (НДС) системы при статическом ее нагружении должно выполняться с учетом отмеченных выше геометрически нелинейных эффектов. При динамическом же анализе, зная НДС конструкции от действующих статических нагрузок, необходимо построить динамическую модель так называемой линеаризованной системы.

Под этим термином понимается конструкция, работающая в геометрически линейной постановке, но учитывающая достигнутый уровень усилий в вантах в состоянии, предшествующем

линеаризации, а также достигнутый уровень усилий сжатия в соответствующих сжатых элементах расчетной схемы.

Обычно под линеаризованной системой понимается исходная система, в которой все составляющие ее элементы рассматриваются в линейной постановке, но с касательными (мгновенными) матрицами жесткости.

Построение такой системы можно выполнить путем замены вантовых элементов стержнями, жесткость которых вычисляется по формуле

$$\overline{EA} = \frac{1}{\frac{1}{EA} + \frac{D_y + D_z}{LH^3}}, \qquad (28.2.4)$$

которая легко получается из (28.2.3) и учитывает тот факт, что вантовый элемент может быть нагружен в двух плоскостях.

Вантовый элемент имеет в библиотеке конечных элементов тип 308. Он допускает такие же виды нагрузок, как и элемент типа 305 — стержень общего положения, описание которого приведено в разд. 3.3. В результате расчета вычисляется натяжение ванты $N_X$. Более подробная информация о расчете вант приведена в [8].

***Внимание:*** **Если в нелинейном загружении задается нагрузка «собственный вес», то на вантовых элементах она будет проигнорирована, т.к. учитывается автоматически. В протоколе решения задачи появится предупреждение:**

В нелинейном загружении (№ загружения) будет проигнорирована дополнительно заданная нагрузка «собственный вес» на вантовые элементы: (список элементов)

## Односторонние связи

Односторонними называют связи, которые могут воспринимать усилия только определенного знака и отключаться при появлении усилий противоположного знака или, что то же самое, допускать перемещения только в определенном направлении и не препятствовать перемещениям в противоположном направлении. Реализованный в программе соответствующий конечный элемент моделирует работу идеальной односторонней связи (без трения).

Как и упругие связи общего вида (см. разд. 3.8, 6.4), односторонние связи могут быть одноузловыми (связь между узлом и «землей») или двухузловыми (связь между двумя узлами). Задание характеристик односторонней связи инициируется нажатием кнопки  на закладке **Узлы и элементы**.

Это инициирует вызов диалогового окна **Односторонние связи** (рис. 28.2-5). В этом окне задается характер работы односторонней связи (связь отключается при сжатии или при растяжении), ее направление и жесткость (усилие, необходимое для того, чтобы реализовать единичное смещение).

Отличительной особенностью односторонней связи являются параметры ее исходного состояния. Например, для простейшей модели стержня, способного воспринять растяжение и выключающегося из работы при появлении сжатия (рис. 28.2-6), можно учесть зазор $\Delta_0$ в односторонней связи или же преднапряжение (натяг), которое может быть интерпретировано и как отрицательный зазор, то есть $\Delta_0 < 0$.

При работе в системе, чтобы связь включилась в работу, должен быть предварительно выбран зазор, или же чтобы она выключилась из работы, должен быть преодолен натяг.

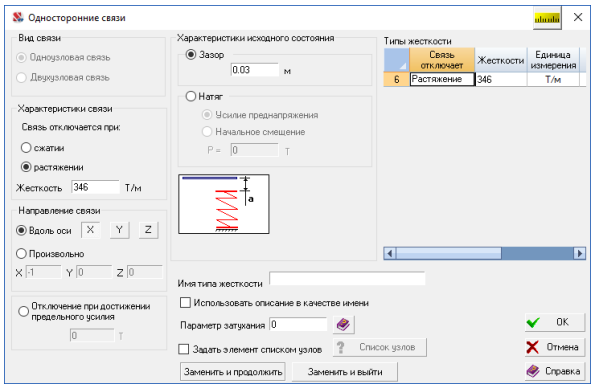



Рис. 28.2-5. *Диалоговое окно* **Односторонние связи**

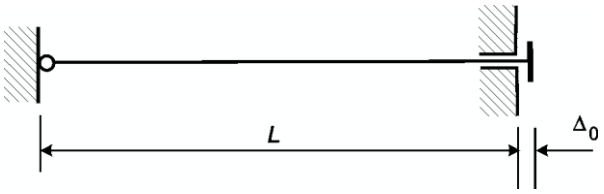



Рис. 28.2-6. *Односторонне работающий стержень*

Два варианта диаграммы работы такого элемента в виде зависимости продольной силы $H$ от увеличения расстояния между концевыми точками $\Delta$ представлены на рис. 28.2-7, где случаю *а* соответствует вариант с предварительным напряжением (натяг равен $H_0$), а случаю *б* — вариант системы с зазором $\Delta_0$.

Тангенс угла наклона диаграммы равен величине $EA/L$ ($EA$ — жесткость стержня на растяжение, $L$ — длина стержня).

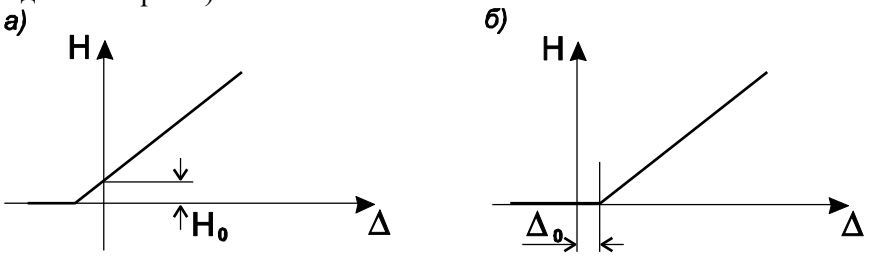



Рис. 28.2-7. *Варианты диаграммы* $H$ — $\Delta$

Одноузловой элемент односторонней связи имеет в библиотеке конечных элементов тип 351, двухузловой – 352. Их линейными аналогами являются элементы, моделирующие связи конечной жесткости, соответственно 51 и 55. В результате расчета вычисляется усилие (реакция в пружине), соответствующее степени свободы, по направлению которой действует связь конечной жесткости в случае ее включения в работу.

Для двухузловой связи ненулевой длины, ее направлением является направление вектора, соединяющего ее узлы, не зависимо от того, что выбрано в диалоговом окне в блоке направление связи.

## 28.3. Физическая нелинейность

### Общие сведения

Необходимость проведения нелинейных расчетов возникает при анализе систем, в которых зависимость напряжения от деформации отличается от закона Гука (простейшие примеры — разрушение бетона при растяжении, пластическое течение, которое может возникнуть в элементах стальных конструкций).

Отметим, что существует множество проблем, которые в настоящее время не решены, и отсутствие этих решений мешает полноценному использованию нелинейного анализа в проектировании (см. [11]).

Возможность расчета систем с учетом нелинейного поведения материала реализована во многих программных комплексах. Во многих из них в качестве исходной информации пользователь должен задать диаграмму σ-ε для каждого материала. В **SCAD** реализован иной подход. Пользователь должен определить, какую физическую модель работы материала следует использовать при расчете. Он (пользователь) может повлиять (установкой тех или иных опций) на

предварительный выбор диаграммы, но окончательно диаграмма будет сформирована программой автоматически. Такой подход связан, в частности, со следующим:

- Далеко не всякая диаграмма, которая может быть задана пользователем, имеет физический смысл;
- Многие идеальные диаграммы (например, диаграмма Прандтля) не во всех случаях могут обеспечить численно устойчивое решение, поскольку в точках излома существует опасность зацикливания или существенного замедления сходимости нелинейного алгоритма, основанного на методе Ньютона-Рафсона и предназначенного для решения системы нелинейных алгебраических уравнений, возникающей при применении метода конечных элементов (это послужило стимулом для использования аппроксимации Паде диаграмм);
- У инженеров, не имеющих опыта проведения нелинейных расчетов, возникает желание использовать диаграммы работы бетона, арматуры, стали, которые приведены в СНиП. При этом они не учитывают тот факт, что приведенные в СНиП, ДБН, ... диаграммы предназначены для других целей (например, анализа работы нормальных сечений железобетонных элементов по нелинейной деформационной модели). Есть, однако, и исключения. Авторы EN 1992 приводят в разделе 3.1.7 EN 1992 диаграммы для проверки несущей способности *сечений* железобетонных элементов, а в разделе 3.1.5 EN 1992 приведена диаграмма для нелинейного расчета *конструкций,* когда возникает необходимость учитывать ниспадающую ветвь кривой σ-ε (диаграммы различны !). Аналогично, для стальных конструкций диаграммы приводятся в разделе 5.4.3 EN 1993-1-1, а в разделе C6 Annex C Finite Element Methods of analysis EN 1993-1-5 приведены диаграммы для конечно-элементного расчета.
- Приведенные в нормах диаграммы не дают возможности в полной мере учесть работу бетона и арматуры. Например, не учитывается деградация бетона в растянутой зоне при раскрытии трещин. Не учитывается также снижение прочности бетона сжатой зоны при прохождении предельной точки.

Важной особенностью использованного алгоритма расчета является преодоление проблемы, связанной с расхождением численного решения после прохождения предельной точки диаграммы σ-ε для бетона при сгущении сетки. Здесь фактором, удерживающим от численной неустойчивости, является наличие арматуры, диаграмма σ-ε для которой не имеет ниспадающей ветви. Но и в этом случае ограничивается наклон ниспадающей ветви к оси деформаций, поскольку в случае слишком быстрого падения поведение системы бетон – арматура также неустойчиво.

Достаточно подробно теория расчета и конечно-элементные процедуры описаны в книге [10]. Ниже приведены лишь краткие сведения о порядке задания необходимой исходной информации.

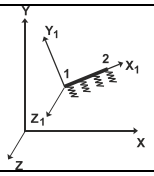
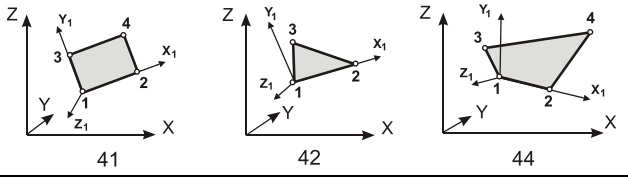
## Физически нелинейные конечные элементы

Физически нелинейные эффекты можно учесть, если в схеме используются конечные элементы, представленные в таблице 28.3-1.

Элементы 405, 410 являются аналогами стержневых элементов, а 441, 442, 444 — элементов оболочки и подробно рассмотрены в разд. 3.3-3.4. У них во многом совпадает задание исходной информации, нагрузок. Совпадают вычисляемые усилия и правила знаков для них (см. разд. 13.5).

Для того чтобы изменить тип линейного элемента на нелинейный для учета физической нелинейности, следует активировать операцию **Назначение элементов для учета нелинейности** в разделе **Назначение** инструментальной панели, выбрать на схеме соответствующие элементы и нажать кнопку **ОК**. Аналогичный результат можно получить и с использованием операции **Назначение типа конечных элементов**. Перед тем, как в соответствующем диалоговом окне (рис. 28.3-1) выбрать тип оболочечного или стержневого элемента (линейный), следует активировать маркер **Учет физической нелинейности**. Присвоение элементам выбранного типа выполняется традиционным способом, а номер типа нелинейного элемента будет автоматически модифицирован путем добавления числа 400.

**Таблица 28.3-1**

| Тип КЭ | Линейный аналог | Описание |
|---|---|---|
| 405, 410 | 5,10 |  |
| 441 442 444 | 41 42 44 |  41 42 44 |

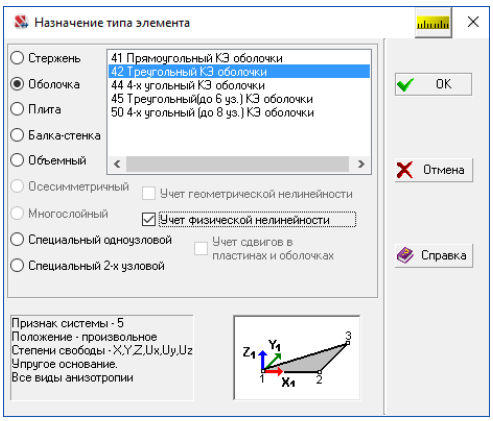



Рис. 28.3-1. *Диалоговое окно* **Назначение типа элемента**

## Модели материалов

Основная особенность в задании исходной информации для физически нелинейных конечных элементов состоит в том, что следует задать данные о характере (нелинейной) работы материала. Для этого при задании жесткостных характеристик для стержневых или пластинчатых элементов следует взвести маркер **Физическая нелинейность** (см. рис. 28.3-2).

При этом появляется возможность выбора типа материала. В программе **SCAD** реализованы два вида нелинейных материалов. Выбор первого из них условно названного *Произвольный* означает, что конструкция изготовлена из мономатериала. Второй вариант — железобетон, то есть биматериальная конструкция, состоящая из бетона с арматурными включениями.

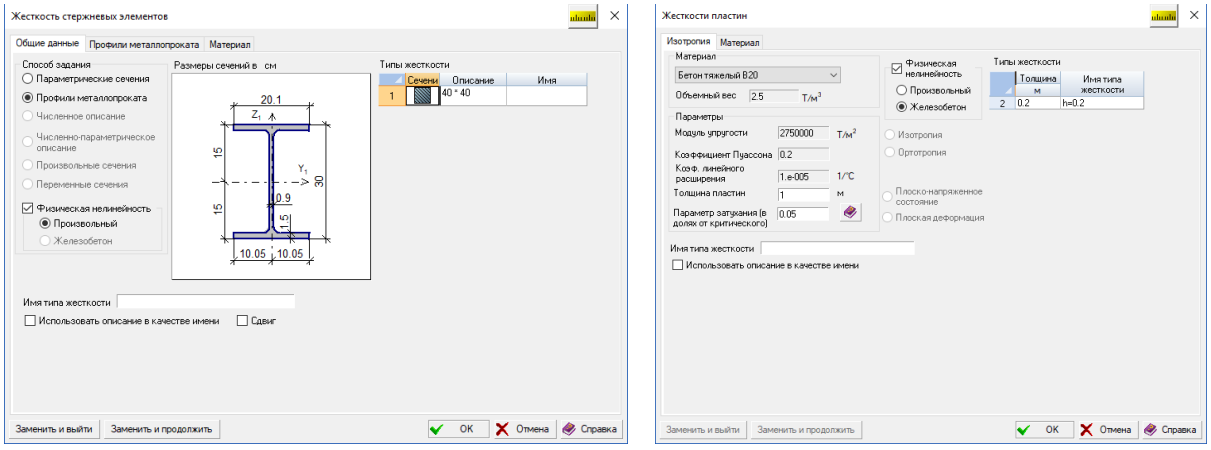



Рис. 28.3-2 Диалоговые окна задания жесткостных параметров стержней и пластин

При задании данных для стержневых элементов физическая нелинейность реализована для параметрических сечений и сечений металлопроката. Естественно для сечений металлопроката возможность выбора материала **Железобетон** заблокирована.

На отдельной странице **Материал** следует определить свойства материала.

### Произвольный материал

Рассмотрим задание данных для случая произвольного материала (рис. 28.3-3).

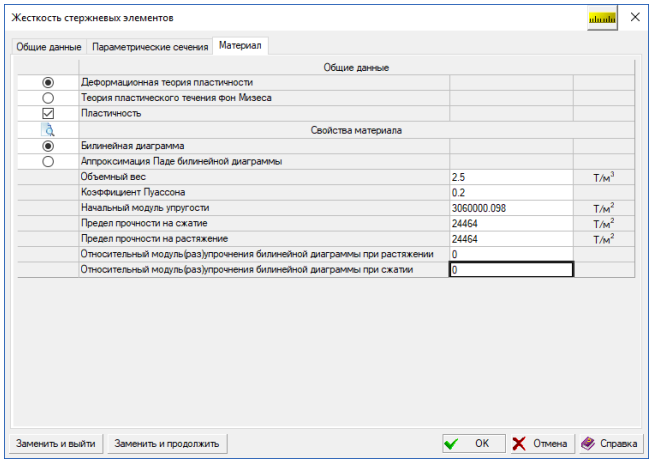



Рис. 28.3-3. Страница **Материал** для случая произвольного материала

В этом случае следует выбрать теорию, которая описывает поведение материала. Реализована *деформационная теория пластичности* [1], [4] и *теория пластического течения фон Мизеса* [12]. Маркер **Пластичность** позволяет указать, следует ли учитывать пластическое поведение. Если маркер **Пластичность** не взведен, то фактически будет предполагаться, что материал работает в условиях нелинейной упругости; в противном случае будут учтены такие эффекты пластичности, как остаточные деформации, возникающие при разгрузке.

**В текущей версии SCAD основной упор сделан на теорию пластического течения, поскольку деформационная теория дает корректные результаты только при простом нагружении**, т. е. тогда, когда в любом бесконечно малом объеме деформируемого тела все компоненты тензора деформаций изменяются пропорционально одному и тому же параметру. Данное условие не всегда выполняется даже тогда, когда все приложенные к телу нагрузки изменяются пропорционально одному параметру, поскольку при монотонно возрастающем параметре нагружения возможно появление зон разгрузки (см., например, [10]). А при циклическом и динамическом нагружении достоверность результатов, полученных на основании деформационной теории пластичности, становится непредсказуемой.

Теорию пластического течения рекомендуется также использовать при быстроменяющемся процессе нагружения (например, расчет по сейсмограмме).

В случае деформационной теории пластичности можно указать тип диаграммы σ-ε (билинейная диаграмма или аппроксимация Паде билинейной диаграммы). На рисунке ниже приведен пример симметричной билинейной диаграммы и аппроксимации Паде этой же диаграммы.

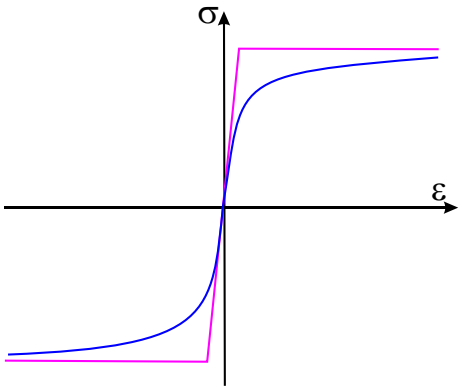



Рис. 28.3-4. Билинейная диаграмма и аппроксимации Паде этой же диаграммы

Включение маркера «геометрическая нелинейность» приводит к учету геометрической нелинейности в квадратичном приближении.

В зависимости от выбранной теории от пользователя требуется также задать следующие данные:

**Таблица 28.3-2**

| Тип данных | Комментарии |
|---|---|
| объемный вес | При создании нового типа жесткости эти данные будут скопированы из данных для линейного расчета, но могут быть изменены для нелинейного расчета |
| коэффициент Пуассона | |
| начальный модуль упругости | |
| Опция учет деградации материала | Деформационная теория пластичности не реализована в данной версии. Теория пластического течения – разрушение материала моделируется с помощью параметра разрушения *p* (рис. 28.3-11). |
| предел прочности материала на сжатие и растяжение | Задаются только при использовании деформационной теории пластичности. Задание различных значений прочности материала на сжатие и растяжение позволяет задавать несимметричные диаграммы |
| относительный модуль (раз)упрочнения билинейной диаграммы при растяжении | |
| относительный модуль (раз)упрочнения билинейной диаграммы при сжатии | |
| предел текучести | Задаются только при использовании теории пластического течения фон Мизеса |
| относительный модуль (раз)упрочнения билинейной диаграммы | |
| Предельная деформация на растяжение ($\varepsilon_{t,max} > 0$) | **Используется только для теории пластического течения.** При $\varepsilon_e \geq \varepsilon_{t,max}$ , где $\varepsilon_e$ – приведенная деформация, моделируется разрушение волокна данного материала, используя элементы механики разрушения. Если $\varepsilon_{t,max}$ задать очень большим, например, $\varepsilon_{t,max} = 1000$, деформация волокна при растяжении не ограничивается. |
| Предельная деформация на сжатие ($\varepsilon_{c,min} < 0$) | **Используется только для теории пластического течения.** При $\varepsilon_e \leq \varepsilon_{c,min}$ , где $\varepsilon_e$ – приведенная деформация, моделируется разрушение волокна данного материала, используя элементы механики разрушения. Если $\varepsilon_{c,min}$ задать очень большим по абсолютной величине, например, $\varepsilon_{c,min} = -1000$, деформация волокна при сжатии не ограничивается. |
| Тип ниспадающей кривой параметра повреждаемости | **Используется только для теории пластического течения.** Следует выбрать тип кривой $f(\varepsilon_e - \varepsilon^*)$, описывающей деградацию материала: экспоненциальная, гиперболическая или линейная. |
| Протяженность ниспадающей ветви параметра повреждаемости | **Используется только для теории пластического течения.** Величина параметра $\xi$ (Рис. 28.3-5). |
| Остаточная прочность | **Используется только для теории пластического течения.** Задает параметр $\alpha \in [0.0001, 1]$ (рис. 28.3-5). |

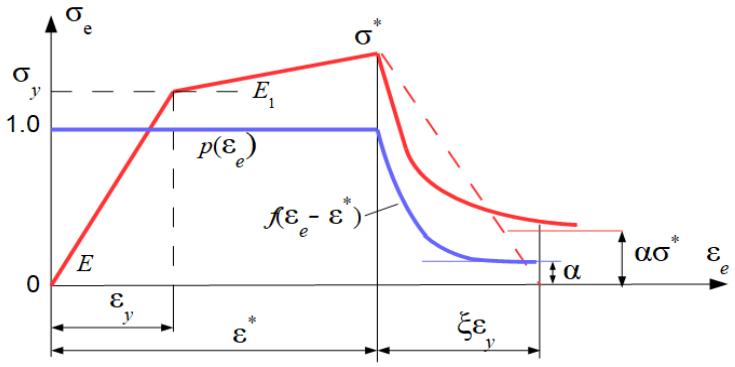



Рис. 28.3-5. Диаграммы $\sigma_e - \varepsilon_e$ (красная кривая) и $p = p(\varepsilon_e)$ (синяя кривая).
Здесь $p$ – параметр повреждаемости

На рис. 28.3-5 представлены диаграмма $\sigma_e - \varepsilon_e$ (приведенное напряжение - приведенная деформация – красная кривая) и $p = p(\varepsilon_e)$ (параметр повреждаемости - приведенная деформация – синяя кривая). Поскольку при использовании теории пластического течения диаграммы для сжатия и растяжения удовлетворяют условию центральной симметрии относительно начала координат, то на рисунке представлена только часть диаграммы для первого квадранта. Диаграмма $\sigma_e - \varepsilon_e$ имеет три участка: линейный ($\varepsilon_e \in [0, \varepsilon_y]$), зона упрочнения ($\varepsilon_e \in [\varepsilon_y, \varepsilon^*]$) и зона деградации ($\varepsilon_e > \varepsilon^*$]), которая начинается при превышении приведенной деформации порогового значения $\varepsilon^*$, причем в зоне растяжения $\varepsilon^* = \varepsilon_{t,max}$ , а в зоне сжатия $\varepsilon^* = \varepsilon_{c,min}$. При $\varepsilon_e > \varepsilon^*$ деградация материала определяется видом функции $f(\varepsilon_e - \varepsilon^*)$.

В случае экспоненциальной зависимости $f(\varepsilon_e - \varepsilon^*) = (1 - \alpha)e^{-b(\varepsilon e - \varepsilon^*)} + \alpha$, причем $b = |\{[\ln(tol/(1 - \alpha)]\}/\{[1 + (1 - \alpha)(1 - \xi)]\ \varepsilon^*\}|$, $tol = 10^{-4}$. Параметры $\alpha$ и $\xi$ определяют быстроту деградации и остаточную прочность.

В случае гиперболической зависимости $f(\varepsilon_e - \varepsilon^*) = (1 - \alpha)\ \varepsilon^*/\varepsilon_e + \alpha$ . Быстрота деградации здесь не изменяется, а параметр $\alpha$ определяет остаточную прочность материала.

В случае линейной зависимости $f(\varepsilon_e - \varepsilon^*) = 1 - (1 - \varepsilon_e/\varepsilon^*)/(1 - \xi)$, причем $f(\varepsilon_e - \varepsilon^*) = 1$, если $f(\varepsilon_e - \varepsilon^*) > 1$, и $f(\varepsilon_e - \varepsilon^*) = \alpha$, если $f(\varepsilon_e - \varepsilon^*) < \alpha$.

Разные материалы обладают разными скоростями деградации и различной величиной остаточной прочности. Строго говоря, эти данные следует определять из экспериментальных исследований. Из нормативных документов обычно известно значение $\varepsilon^*$. А вот скорость деградации и остаточная прочность изучены значительно хуже. Тем не менее, следует попытаться найти в научно-технических публикациях информацию о параметрах разрушения данного материала. Часто оказывается так, что при $\xi \in [5, 20]$ и $\alpha \in [0.01, 0.05]$ удается получить приемлемый результат, слабо зависящий от величин $\xi$ и $\alpha$, находящихся в указанных пределах. Попытки приблизиться к мгновенному разрушению материала (малые значения $\xi$) часто приводят к расходимости итерационного процесса при появлении деградации, особенно при игнорировании сил инерции и диссипации, когда методы нелинейной динамики применяются к решению статических задач. Задачи нелинейной динамики (силы инерции и диссипации учитываются) обычно более устойчивы к сингулярным особенностям расчетной модели, чем задачи статики, поэтому значительно чаще, чем задачи статики, позволяют получить сходящееся решение даже при малых значениях параметра $\xi$ ($\xi < 5$).

Влияние относительных модулей $\theta$ упрочнения (разупрочнения) на модель материала проще всего продемонстрировать на примере идеализированных диаграмм $\sigma$-$\varepsilon$ (рис. 28.3-6).

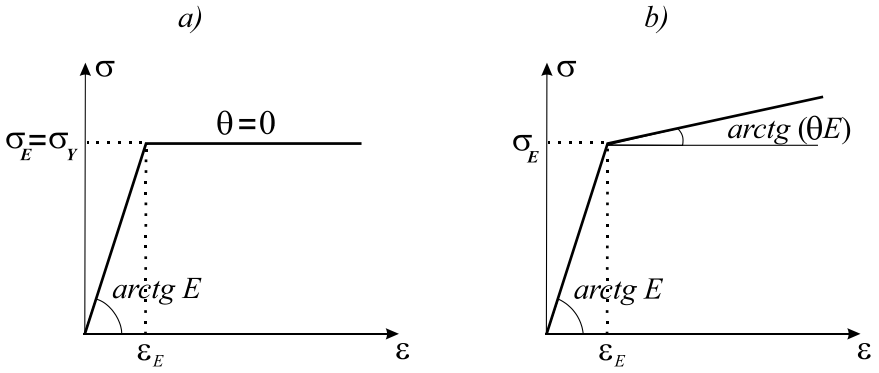



Рис. 28.3-6. Идеализированные диаграммы σ-ε:
*a*) диаграмма Прандтля; *b*) диаграмма Прандтля с линейным упрочнением

После задания всей необходимой информации можно воспользоваться кнопкой  для предварительного просмотра диаграммы σ-ε (рис. 28.3-7).

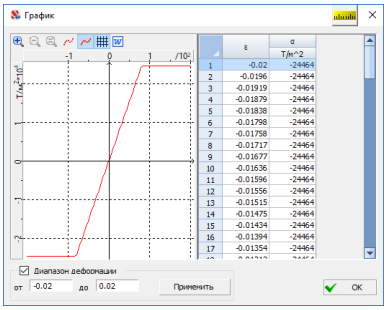
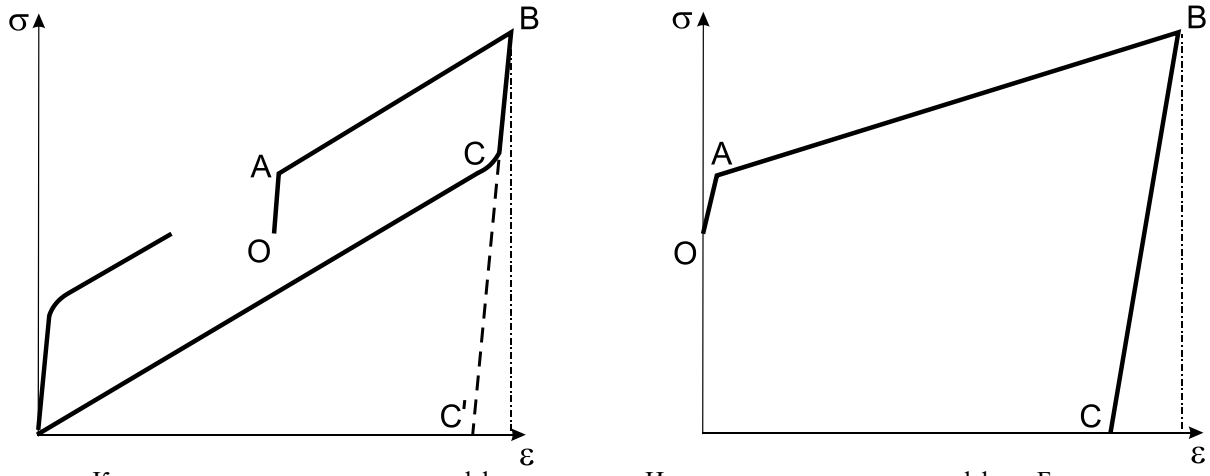



Рис. 28.3-7. Предварительный просмотр диаграммы σ-ε

В данном диалоговом окне, можно использовать маркер **Диапазон деформации** и получить возможность задать нужный диапазон изменения деформации ε. График будет обновлен после нажатия кнопки **Применить**.

В случае теории пластического течения для произвольного материала диаграмма σ – ε принимается симметричной билинейной – пределы текучести на растяжение и на сжатие, а также параметры упрочнения/разупрочнения на растяжение и на сжатие совпадают. Кроме того, появляется маркер **Учесть эффект Баушингера**. Эффект Баушингера состоит в снижении предела текучести материала при деформировании в противоположном направлении после того, как материал был подвергнут пластическим деформациям заданного направления. Поясним это явление на следующем примере. Рассмотрим стальной стержень, подверженный действию осевой силы. Стержень находится в одноосном напряженном состоянии ($\sigma_x \neq 0$, остальные компоненты тензора деформаций равны нулю). Сначала сила увеличивается от нуля до заданной величины – стержень растягивается, затем сила уменьшается до нуля, затем – до заданной величины с обратным знаком, а затем увеличивается до нуля. Таким образом, задается простой цикл нагружения с постоянной амплитудой. Рассматриваются две модели материала. Первая модель учитывает эффект Баушингера, а вторая – нет. На рис. 28.3-8 представлены соответствующие диаграммы σ – ε, полученные непосредственно из решения данной тестовой задачи.




Кинематическое упрочнение – эффект Баушингера учтен

Изотропное упрочнение – эффект Баушингера не учтен

Рис. 28.3-8.

При учете эффекта Баушингера (рис. 28.3-8 слева) участок ОА соответствует упругому поведению материала, АВ – упруго-пластическому поведению материала с упрочнением. В точке В сила достигает максимального значения и начинает уменьшаться. При этом в стержне сначала происходит упругая разгрузка, а затем нагружение до момента достижения предела текучести при сжатии (линейный участок ВС). Вследствие учета эффекта Баушингера предел текучести материала при сжатии сместился из точки С´ в точку С. В случае не учёта эффекта Баушингера (рис. 28.3-8 справа) смещения точки С не происходит. В этой точке достигается максимальное значение нагрузки при сжатии, а при уменьшении нагрузки изображающая точка движется по прямой ВС от точки С до нуля, совершая упругую разгрузку.

Мы видим, что учет либо не учет эффекта Баушингера приводит к совершенно различному поведению материала. В первом случае диаграмма σ – ε носит ярко выраженный гистерезисный характер, а во втором – нет. В первом случае в теории пластического течения используется кинематическое упрочнение, при котором поверхность текучести не расширяется после того, как изображающая точка на нее вышла, а перемещается в пространстве главных напряжений как абсолютно твердое тело параллельно гидростатической оси ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$). Во втором случае используется изотропное упрочнение, при котором поверхность текучести равномерно расширяется.

Выбор модели материала зависит от свойств самого материала. Для стали и большинства металлов проявляется эффект Баушингера. Для бетона и кирпичной кладки – нет. **Особенно важно учитывать эффект Баушингера при циклическом и динамическом нагружении.**

### *Железобетон*

Перейдем теперь к случаю железобетона (рис. 28.3-9). Общая схема задания данных аналогична описанному выше случаю произвольного материала. Основной особенностью является то, что следует задавать данные как для бетона, так и для арматуры.

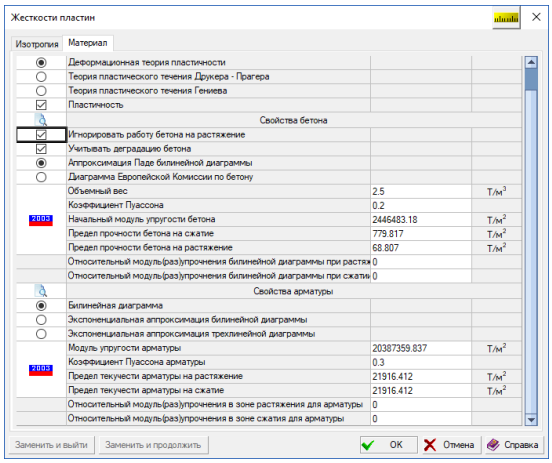



Рис. 28.3-9. Страница **Материал** для случая железобетона

В настоящее время реализованы расчеты, в которых работа бетона описывается на основании деформационной теории пластичности [1], [4], теории пластического течения Друкера-Прагера [13] или теории пластического течения, в которой в качестве поверхности текучести используется поверхность прочности, предложенная Гениевым [2].

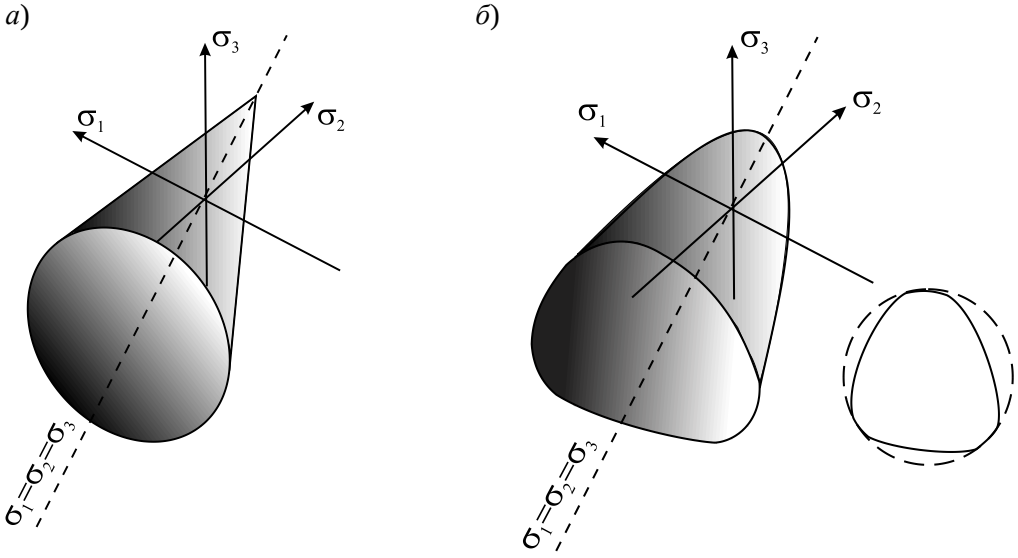



Рис. 28.3-10. Поверхность текучести: *а* - Друкера-Прагера, *б* - Гениева

Для бетона можно указать, следует ли игнорировать работу бетона на растяжение, учитывать или не учитывать пластичность и/или деградацию бетона, вызванную образованием и развитием трещин.

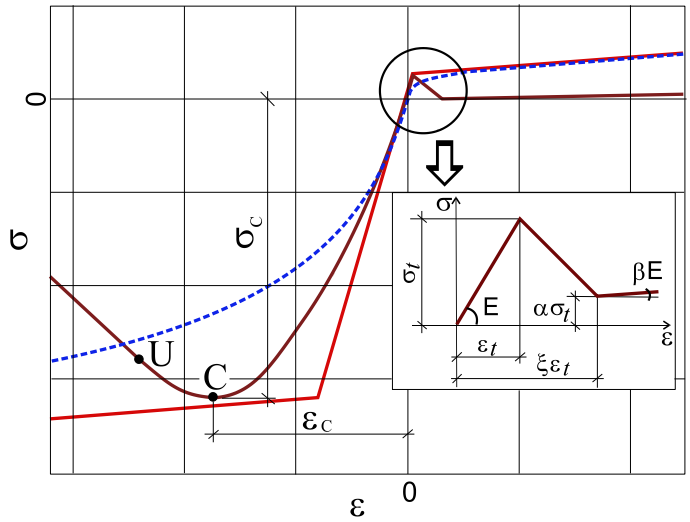
Полный перечень данных, которые могут быть запрошены у пользователя о свойствах бетона, приведен в таблице 28.3-3.

**Таблица 28.3-3**

| Тип данных | Комментарии |
|---|---|
| Тип диаграммы:<br>• аппроксимация Паде билинейной диаграммы<br>• диаграмма Европейской Коммисии по бетону (**ЕКБ**) | Выбор диаграммы возможен только при расчете на основании деформационной теории пластичности |
| Опции:<br>• Игнорировать работу бетона на растяжение<br>• Учет деградации бетона | Использовать опцию *Игнорировать работу бетона на растяжение* можно только при расчете на основании деформационной теории пластичности |

| | |
|---|---|
| | Опция *Учет деградации бетона* в случае деформационной теории пластичности позволяет для диаграммы ЕКБ при переходе из сжатой зоны в растянутую учесть только остаточную прочность бетона, задаваемую параметром α. В случае теории пластического течения действие данной опции позволяет выбрать модель деградации бетона при растрескивании (см. описание ниже). |
| Объемный вес | При создании нового типа жесткости эти данные будут скопированы из данных для линейного расчета, но могут быть изменены для нелинейного расчета |
| Коэффициент Пуассона | |
| Начальный модуль упругости бетона | |
| Предел прочности бетона на сжатие | |
| Предел прочности бетона на растяжение | |
| Относительный модуль (раз)упрочнения билинейной диаграммы при растяжении | В случае использования теории пластического течения позволяет задать разупрочнение бетона в области растяжения. Если включена опция «Учитывать деградацию бетона», то разупрочнение бетона игнорируется, однако деградация бетона при растрескивании моделируется с помощью параметра повреждаемости. |
| Относительный модуль (раз)упрочнения билинейной диаграммы при сжатии | В случае использования теории пластического течения позволяет задать разупрочнение бетона в области сжатия. В этом случае поверхность текучести будет сжиматься после того, как ее достигнет изображающая точка. |
| Предельная деформация бетона при сжатии | |
| Остаточная прочность α | Ограничивает уменьшение величины приведенного напряжения $\sigma_e$ при деградации бетона: $\sigma_e = \begin{cases} \sigma_e, & \sigma_e > \alpha\sigma_t \\ \alpha\sigma_t, & \sigma_e \le \alpha\sigma_t \end{cases}, \quad t \leftrightarrow c$ |
| Протяженность ниспадающей ветви в зоне растяжения | Параметры требуются только при использовании диаграммы ЕКБ |
| Вторичное упрочнение | |
| Деформация, соответствующая пределу прочности бетона на сжатие | |
| Отношение напряжения в точке U и предела прочности бетона на сжатие | Задается только при использовании диаграммы ЕКБ, деформационная теория пластичности. По умолчанию принимается значение 0.85. |
| Отношение деформации в точке U и деформации, соответствующей пределу прочности бетона на сжатие | По умолчанию принимается значение 1.41. |
| Отклонение параболоида Гениева от круговой формы | Параметр требуется только при использовании теории пластического течения Гениева (по умолчанию принят равным 0.577). |
| Тип ниспадающей кривой параметра повреждаемости бетона | **Используется только для теории пластического течения.** Следует выбрать тип кривых $f(\varepsilon_e - \varepsilon_t)$, $f(\varepsilon_U - \varepsilon_e)$, описывающих деградацию материала: экспоненциальная, гиперболическая или линейная. |

Физический смысл параметров, которые относятся к диаграмме ЕКБ, понятен из рисунка 28.3-11,




где: билинейная; аппроксимация Паде; диаграмма ЕКБ.

Рис. 28.3-11. Диаграммы работы бетона

Диаграмма ЕКБ представляется соотношениями

$$\sigma(\varepsilon)=\begin{cases} E\varepsilon, \quad 0\le\varepsilon\le\varepsilon_t, \\ \alpha\sigma_t+\dfrac{(1-\alpha)E}{1-\xi}(\varepsilon-\xi\varepsilon_t), \quad \varepsilon_t\le\varepsilon\le\xi\varepsilon_t, \xi>1, \\ \alpha\sigma_t+\beta E(\varepsilon-\xi\varepsilon_t), \quad \varepsilon>\xi\varepsilon_t, \\ \dfrac{\dfrac{E}{E_r}\varepsilon_r\sigma_c}{1+A\varepsilon_r+B\varepsilon_r^2+C\varepsilon_r^3}, \quad \varepsilon_u\le\varepsilon<0. \end{cases}$$

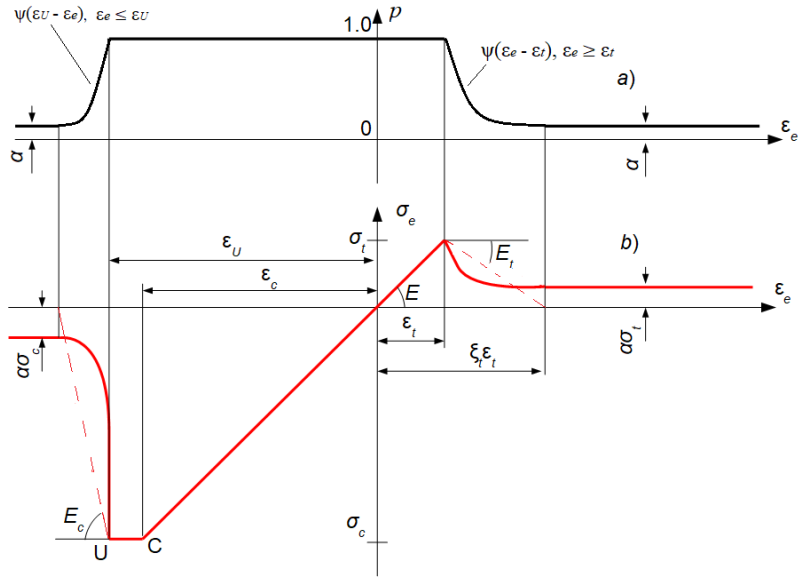
где точка $C(\varepsilon_c, \sigma_c)$ соответствует пределу прочности на сжатие, точка $U(\varepsilon_u, \sigma_u)$ – предельная точка, ограничивающая диапазон изменения деформаций для кривой ЕКБ, причем согласно рекомендациям [5], $\sigma_u = 0.85\cdot\sigma_c$ и $\varepsilon_u = 1.41\cdot\varepsilon_c$. Остальные параметры соответствуют приведенным в [11]:

$$E_r=\sigma_c/\varepsilon_c, \quad \varepsilon_r=\varepsilon/\varepsilon_c, \quad E_u=\sigma_u/\varepsilon_u, \quad p=\varepsilon_u/\varepsilon_c,$$

$$A=\left[\frac{E}{E_u}+\left(p^3-2p^2\right)\frac{E}{E_r}-\left(2p^3-3p^2+1\right)\right]/\left[p\left(p^2-2p+1\right)\right],$$

$$B=2\frac{E}{E_r}-3-2A, \quad C=2-\frac{E}{E_r}+A.$$

При использовании теории пластического течения опция *Учет деградации бетона* позволяет выбрать механизм учета снижения прочности бетона в результате растрескивания. Если соответствующий маркер выключен, то при выходе изображающей точки на поверхность текучести происходит сжатие последней – реализуется механизм разупрочнения. При этом программа сжатия определяется ниспадающей ветвью диаграммы σ – ε и детально описано в [10, стр. 23 – 26], а результаты решения тестовых задач представлены в разделе 3 этой же книги.




$$P(\varepsilon_e)=\begin{cases}1, & \varepsilon_e\in[\varepsilon_U,\varepsilon_t]\\ \psi(\varepsilon_e-\varepsilon_t), & \varepsilon_e\ge\varepsilon_t\\ \psi(\varepsilon_U-\varepsilon_e), & \varepsilon_e\le\varepsilon_t\end{cases}$$

Рис. 28.3-12. Зависимость параметра $p$ от приведенной деформации $\varepsilon_e$ ($a$) и соответствующая диаграмма $\sigma_e - \varepsilon_e$ ($b$)

Если маркер *Учет деградации бетона* включен, поверхность текучести остается замороженной, а для моделирования деградации бетона при растрескивании используются элементы механики разрушения. На рис. 28.3-12 ($a$) изображена зависимость параметра $p$ от приведенной деформации $\varepsilon_e$, а на рис. 28.3-12 ($b$) – примерный вид диаграммы $\sigma_e - \varepsilon_e$, получаемой из расчета. Точки C, U соответствуют одноименным точкам диаграммы ЕКБ (рис. 28.3-11).

Быстрота ниспадающих участков на рис. 28.3-12 ($a$) определяется отношением $E_t/E$ в зоне растяжения и $E_c/E$ в зоне сжатия: $\xi_t = 1 + E/E_t$ ($t \leftrightarrow c$, $E_1 \le 0$). Из выпадающего списка “Тип ниспадающей кривой параметра повреждаемости бетона” выбираем тип кривых $f(\varepsilon_e - \varepsilon_t)$, $f(\varepsilon_U - \varepsilon_e)$ – см. рис. 28.3-12 и пояснения к рис. 28.3-5.

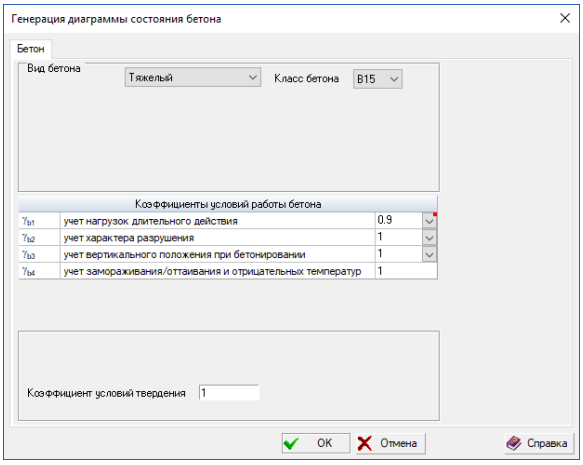



Рис. 28.3-13. *Диалоговое окно* **Генерация диаграммы состояния бетона**

Нажатие кнопки 2012 с иконой выбранного нормативного документа по расчету железобетонных конструкций вызывает диалог (рис. 28.3-13), в котором можно задать класс бетона, коэффициенты условий работы и нажав кнопку **OK** автоматически заполнить данные о свойствах бетона (начальный модуль упругости, предел прочности на сжатие и предел прочности на растяжение), взятые из норм. После этого, эти данные могут быть изменены пользователем.

Авторы сознательно оставили возможность внесения изменений, поскольку во многих случаях например, при расчете на действие сейсмических нагрузок следует использовать дополнительные коэффициенты условий работы, учитывающие динамическое упрочнение материала.

Необходимые данные о работе арматуры:

**Таблица 28.3-4**

| Тип данных | Комментарии |
|---|---|
| Тип диаграммы:<br>• билинейная диаграмма<br>• экспоненциальная аппроксимация билинейной диаграммы<br>• экспоненциальная аппроксимация трехлинейной диаграммы | Экспоненциальные аппроксимации билинейной и трехлинейной диаграмм доступны только при расчете на основании деформационной теории пластичности. В случае теории пластического течения принимается симметричная билинейная диаграмма и критерий текучести фон Мизеса. |
| Модуль упругости арматуры | |
| Коэффициент Пуассона арматуры | |
| Предел текучести арматуры на растяжение | |
| Предел текучести арматуры на сжатие | |
| Относительный модуль (раз)упрочнения в зоне растяжения для арматуры | |
| Относительный модуль (раз)упрочнения в зоне сжатия для арматуры | |
| Предельная деформация для растянутой арматуры $\varepsilon_{ul,t}$ | Если $\varepsilon_e > \varepsilon_{ul,t}$, моделируется мгновенный разрыв арматурного стержня. Для отключения разрыва арматурного стержня надо задать $\varepsilon_{ul,t} = 1000$ (или другое большое положительное число) |
| Предельная деформация для сжатой арматуры $\varepsilon_{ul,c}$ | Если $\varepsilon_e > \varepsilon_{ul,c}$, моделируется мгновенный разрыв арматурного стержня. Для отключения разрыва арматурного стержня надо задать $\varepsilon_{ul,t} = -1000$ (или другое большое отрицательное число) |
| Тип ниспадающей кривой параметра повреждаемости арматуры | **Используется только для теории пластического течения.** Следует выбрать тип кривой $f(\varepsilon_e - \varepsilon^*)$, описывающей деградацию материала: экспоненциальная, гиперболическая или линейная. |
| Нижняя граница параметра повреждаемости арматуры | **Используется только для теории пластического течения.** Задает параметр $\alpha \in [0.0001, 1]$ (рис. 28.3-5). |
| Протяженность ниспадающей ветви параметра повреждаемости арматуры | **Используется только для теории пластического течения.** Величина параметра $\xi$ (Рис. 28.3-5). |
| Учесть эффект Баушингера (пластическое течение) | **Используется только для теории пластического течения.** Всегда рекомендуется задавать при относительном упрочнении больше нуля и стальной арматуре |

Обращаем внимание, что в задачах статики, как только начинается деградация арматуры (начало разрыва), итерационный процесс решения нелинейной задачи обычно начинает расходиться. В этом случае рекомендуется увеличивать параметр $\xi$ (экспоненциальная и линейная зависимости – см. пояснения к рис. 28.3-5). Если и это не помогает, то рекомендуется заменить решение задачи статики решением задачи нелинейной динамики **при медленном изменении нагрузки во времени и параметрах диссипации меньших, чем при критическом демпфировании**. При решении задачи нелинейной динамики вычислительная процедура является более устойчивой, и для многократно статически неопределимых систем во многих случаях позволяет получить решение.

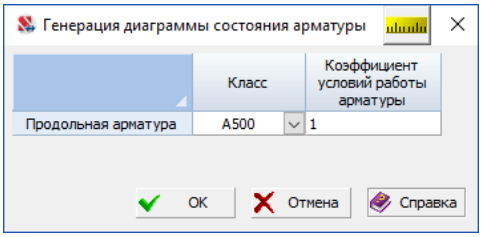



Рис. 28.3-14. *Диалоговое окно* **Генерация диаграммы состояния арматуры**

Нажатие кнопки 2012 с иконой выбранного нормативного документа по расчету железобетонных конструкций вызывает диалог (рис. 28.3-14), в котором можно задать класс продольной арматуры, коэффициент условий работы и, нажав кнопку **OK**, автоматически заполнить данные о свойствах арматуры, взятые из норм. После этого эти данные могут быть изменены пользователем.

Перечисленной выше информации еще недостаточно для физически нелинейного расчета железобетонных элементов. Для них должны быть заданы схемы армирования (см. раздел 19.14), и эти элементы должны быть включены в одну из групп конструктивных железобетонных элементов. Из этих групп будет, в частности, заимствована информация о защитных слоях.

При численном решении оболочечные конечные элементы разбиваются по толщине на слои (по умолчанию, их количество равно 20), кроме того, имеются еще и слои арматуры.

Поперечное сечение стержневых элементов программа разбивает на треугольники. По умолчанию используется триангуляции, при которой площадь каждого треугольника не превышает 5% общей площади поперечного сечения. Однако, используя операцию **Назначение дополнительных данных для элементов** (см. раздел 7.3), пользователь может для конкретных элементов эти данные (число слоев и плотность триангуляции) изменить (для увеличения точности расчета). Например, если задать плотность триангуляции 5 (в пять раз больше, чем по умолчанию) то будет созданы треугольники с площадью, не превышающей 1% площади поперечного сечения.

Используемые на сегодняшний день оболочечные конечные элементы не моделируют работу упругого основания. Этот недостаток можно исправить следующим образом. После разбивки фундаментной плиты на конечные элементы 442 или 444 типа и назначения свойств материала и арматуры копируем фундаментную плиту на удобное для работы с графическим препроцессором расстояние. В образовавшейся копии, которая точно отображает геометрию фундаментной плиты, изменяем типы элементов на 42 и 44 соответственно, создаем новый тип жесткости, задаем малую толщину (например, 0.0001 м) и малый модуль упругости (например, $0.001 \cdot E_c$, где $E_c$ – начальный модуль деформации бетона) и задаем параметры упругого основания. В дальнейшем для быстрого доступа к элементам образованной тонкой «пленки» можем создать отдельную группу конечных элементов. Затем возвращаем тонкую «пленку» на свое место и сливаем совпадающие узлы. Таким образом мы «наклеили» тонкую «пленку» с упругим основанием на фундаментную плиту.

## Учет геометрической нелинейности

Если был выбран расчет на основании теории пластического течения, то становится доступным маркер **Учесть геометрическую нелинейность**.

Одновременный учет как геометрической, так и физической нелинейности охватывает как стержневые конечные элементы 405 типа, так и конечные элементы плоской оболочки 442 и 444 типов. В первую очередь это может оказаться крайне необходимым для элементов металлоконструкций. Поскольку для анализа упруго-пластического поведения металлоконструкций естественно применять теорию пластического течения, в текущей версии **SCAD** мы ограничились разработкой этой опции, реализованной как для однородного материала, так и для железобетона только для теории пластического течения.

Учет геометрической нелинейности в случае железобетона производится как для бетона, так и для арматуры. Для оболочечных конечных элементов используются следующие выражения для мембранных деформаций:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2 + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2 + z\kappa_x$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2 + z\kappa_y \quad , \qquad (28.2.1)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x}\cdot\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\cdot\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial x}\cdot\frac{\partial w}{\partial y} + 2z\chi$$

Здесь $u$, $v$, $w$ – перемещения точек срединной поверхности, $\kappa_x$, $\kappa_y$ – изменения кривизн в направлении осей $OX$, $OY$ локальной системы координат конечного элемента, а $\chi$ – кручение срединной поверхности. Приведенные выражения отличаются от известных уравнений фон Кармана, поскольку содержат слагаемые $\frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2$ в первом уравнении,

$\frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2+\frac{1}{2}\left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2$ – во втором и $\frac{\partial u}{\partial x}\cdot\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}\cdot\frac{\partial v}{\partial y}$ – в третьем, что **является критически важным для корректного моделирования поведения гибких элементов металлоконструкций при использовании плоских оболочечных элементов**.

Для стержневого конечного элемента 405 типа в выражении для продольной деформации $\varepsilon_x$ удерживаются члены разложения в ряд Тейлора до восьмого порядка включительно, что позволяет моделировать начальное закритическое поведение.

**При интерпретации результатов следует помнить, что в данной реализации в отличие от традиционного подхода, использующего при моделировании геометрической нелинейности пластины и оболочки Кирхгофа-Лява и стержни Кирхгофа-Клебша, мы используем пластины и оболочки Миндлина-Рейсснера и стержни типа Тимошенко, что может повлиять на результаты анализа.**

## 28.4. Управление нелинейным расчетом

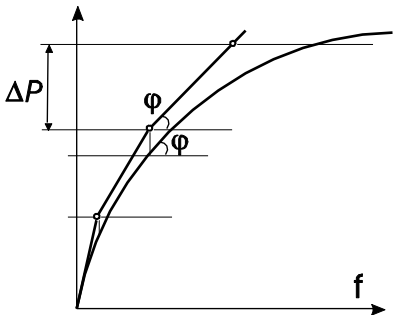



Рис. 28.4-1. *Графическая иллюстрация модификаций шагового метода (простой)*

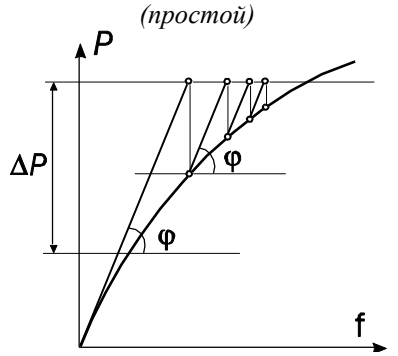



Рис. 28.4-2. *Графическая иллюстрация модификаций шагового метода (с уточнениями)*

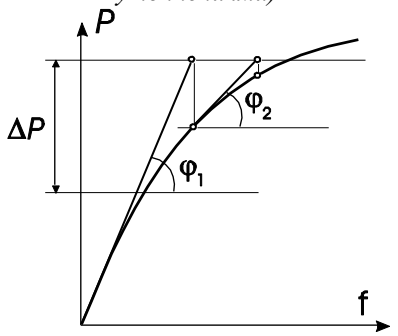



Рис. 28.4-3. *Графическая иллюстрация модификаций шагового метода (шагово-итерационный)*

Нелинейные расчеты выполняются с применением шагового метода, идея которого основана на отслеживании поведения системы при относительно малых приращениях нагрузки. При этом на каждом шаге решается линеаризованная система разрешающих уравнений для текущего приращения вектора узловых нагрузок, сформированного для рассматриваемого загружения.

Расчет ориентирован на решение нелинейных задач в нескольких модификациях шагового метода:

- простой шаговый метод;
- шаговый метод с уточнениями;
- шагово-итерационный метод.

В простом шаговом методе (рис. 28.4-1) на каждом шаге $\Delta P$ решается линеаризованная задача и в предположении, что это решение является достаточно точным, реализуется переход к следующему шагу нелинейного загружения. Погрешность решения нелинейной задачи не контролируется, количество шагов задается пользователем. При этом жесткость линеаризованной системы (тангенс угла наклона φ) принимается без учета невязки в усилиях.

Шаговый метод с уточнениями предусматривает итерационное уточнение нелинейной нагрузки на очередном шаге $\Delta P$ за счет учета невязки в уравнениях равновесия. При этом итерации выполняются с неизменным значением линеаризованной матрицы жесткости (рис. 28.4-2), которая была вычислена в начале очередного шага (угол φ остается неизменным на шаге).

Наконец, в шагово-итерационном методе (рис. 28.4-3) производится итерационное уточнение решения на каждом шаге $\Delta P$ с корректировкой линеаризованной матрицы жесткости на каждой итерации (угол φ меняется внутри шага).

Шаговый процесс имитирует поведение системы при увеличивающейся (уменьшающейся, если значения коэффициента загружения отрицательны) интенсивности нагрузок, действующих на систему. При этом предполагается, что все компоненты нагрузок, относящиеся к указанному загружению, увеличиваются (уменьшаются) одновременно в одной и той же пропорции.

Реализована возможность исследования истории нелинейного загружения в форме задания последовательности отдельных вариантов загружения. В этом случае начало приложения нового нелинейного загружения соответствует окончанию предыдущего, т. е. новое загружение является продолжением предыдущего. В частности, возможно использование ранее смоделированного загружения, но с отрицательной величиной коэффициента загружения, что позволяет исследовать полный цикл «нагрузка-разгрузка». Этот прием дает возможность оценить точность расчета по расхождению начального и конечного состояний системы.

Анализ напряженно-деформированного состояния конструкции с учетом нелинейных эффектов выполняется в тех случаях, когда в расчетной схеме задан по крайней мере один нелинейный элемент. В качестве таких элементов могут быть назначены стержни различного вида, трех- и четырехузловые элементы оболочек, для которых предусмотрен учет геометрической нелинейности, а также одно- и двухузловые элементы, моделирующие односторонние связи, вантовые элементы. Допускается комбинирование в одной задаче линейных и нелинейных конечных элементов.

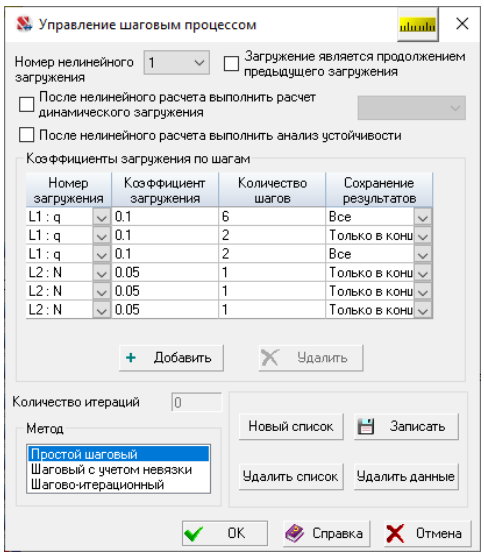



Рис. 28.4-4. *Диалоговое окно* **Управление шаговым процессом**

Данные для управления анализом напряженно-деформированного состояния конструкции задаются в диалоговом окне **Управление шаговым процессом** (рис. 28.4-4), которое вызывается из раздела **Расчетная схема** дерева проекта (операция **Моделирование нелинейных нагрузок**). Диалоговое окно содержит список заданных нелинейных загружений, таблицу для моделирования загружения конструкции, список для выбора модификации шагового метода, поле ввода количества итераций, а также ряд исполнительных кнопок.

В каждой строке таблицы вводятся данные, описывающие один шаг. Для подготовки данных следует:

- в столбце **Номер загружения** выбрать из списка номер линейного загружения (или комбинации загружений);
- в столбце **Коэффициент загружения** ввести коэффициент к нагрузке для текущего шага в виде множителя к величине полной нагрузки;
- в столбце **Количество шагов** ввести количество шагов, которые следует выполнить с заданным коэффициентом (если число больше единицы, то шаг будет состоять из нескольких шагов, каждый из которых будет выполняться с заданным в предыдущем столбце коэффициентом загружения);
- в столбце **Сохранение результатов** выбрать нужную опцию (**Не сохранять, Только в конце** или **Все**). Опцию **Только в конце** следует выбирать, если предполагается анализ результатов текущего шага без результирующей информации промежуточных шагов. Для сохранения результатов всех промежуточных шагов следует использовать опцию **Все** ;
- повторить перечисленные выше действия для каждого шага анализа;
- в списке **Метод** выбрать необходимую модификацию шагового метода;
- если выбран шагово-итерационный метод, то в поле **Количество итераций** надо ввести ограничение на число итераций;
- нажать кнопку **Записать**, после чего подготовленные данные попадут в список нелинейных загружений;
- если необходимо подготовить несколько списков, следует нажать кнопку **Новый список** и повторить перечисленные действия для других загружений;
- в случаях, когда результаты расчета нового списка являются продолжением загружения предыдущего, после нажатия кнопки **Новый список** следует активировать опцию **Загружение является продолжением предыдущего загружения**.

Предусмотрены также следующие опции:

- **После нелинейного расчета выполнить расчет динамического загружения.** При включении этого маркера активируется список с набором динамических загружений модели. После выполнения шагов нелинейного расчета будет выполнен выбранный в списке динамический расчет (для системы, линеаризованной после нелинейного расчета).
- **После нелинейного расчета выполнить анализ устойчивости**. При включении этого маркера после выполнения нелинейного расчета будет выполнен анализ устойчивости (для системы, линеаризованной после нелинейного расчета). Обязательным является наличие данных для выполнения анализа устойчивости линейной системы.

Для удаления текущего списка (его номер соответствует номеру нелинейного загружения) используется кнопка **Удалить список**. Если нажать кнопку **Удалить данные**, то удаляется вся управляющая информация, и выполнение нелинейного расчета блокируется.

При нелинейном расчете используются также дополнительные параметры, описанные в главе 11.

При проведении нелинейного расчета в протокол расчета после каждого шага итерационного процесса выводится относительная невязка (по деформациям и нагрузкам).



**При выполнении линейного расчета нелинейные элементы, присутствующие в расчетной схеме, работают как соответствующие им линейные элементы.**

## 28.5. Результаты расчета

При графическом анализе результатов расчета (деформации, эпюры усилий и т. п.) в списке «Выбор загружения» (рис. 28.5-1) дополнительно к описанным в главе 12 параметрам, указывается номер шага в загружении, на котором выполнено сохранение результатов расчета.

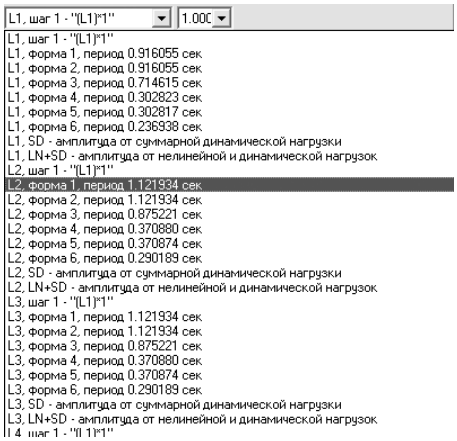



Рис. 28.5-1. *Список «Выбор загружения» для нелинейного расчета*

Для результатов динамических загружений шаг не указывается, т.к. для нелинейного загружения динамический расчет для линеаризованной схемы выполняется по завершению всех шагов загружения.

В случае нелинейного расчета в списке «Выбор загружения» (рис. 28.5-1) используются следующие обозначения для идентификации выводимой информации:

**LN + LS** – амплитуда от нелинейной и статической нагрузки (статический ветер) динамического загружения;

**LN + SD** – амплитуда от нелинейной и динамической огибающей составляющих динамического загружения;

**LN + LS + SD** или **LN + LS – SD** – амплитуда от нелинейной, статической и динамической составляющих динамического загружения;

**LN + S1, LN – S1, LN + S2, LN – S2 ...** – амплитуда от нелинейной, и динамической огибающей от действительной и мнимой составляющих динамического загружения;

**LN + T1, LN + T2, ...** – амплитуда от нелинейной и динамической составляющей в указанный момент времени.

На рис. 28.5-2 приведен фрагмент таблицы перемещений для нелинейной задачи, таблица сформирована **Документатором**.

Для того чтобы результаты нелинейного расчета можно было использовать при подборе/экспертизе стальных и/или железобетонных конструкций, должны быть вычислены расчетные сочетания усилий (см. главу 18).

**Перемещения**
Единицы измерений: мм.
Параметры выборки:
Список узлов/элементов: все
Список загружений/комбинаций: все
Список факторов: все

**Перемещения**

| Номер узла | Номер загружения | Номер шага | Номер формы | Значения | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | X | Y | Z | Ux | Uy | Uz |
| 4 | 1 | 1 | | -0.003 | -0.003 | -0.492 | -0.259 | 0.259 | 9.039e-017 |
| 4 | 1 | | 1 | -6.199 | -6.198 | -0.425 | 1.38 | -1.381 | 6.764e-007 |
| 4 | 1 | | 2 | -6.191 | 6.193 | 5.562e-005 | -1.441 | -1.44 | 0.005 |
| 4 | 1 | | 4 | -1.03 | -1.03 | 0.033 | 0.191 | -0.191 | -3.261e-007 |
| 4 | 1 | | 5 | -1.027 | 1.027 | -1.262e-006 | -0.198 | -0.198 | 0.003 |
| 4 | 1 | | SD | 8.881 | 8.881 | 0.426 | 2.014 | 2.014 | 0.006 |
| 4 | 1 | | LN+SD | -8.885 | -8.885 | -0.918 | -2.274 | 2.274 | 0.006 |
| 4 | 2 | 1 | | -0.003 | -0.003 | -0.492 | -0.259 | 0.259 | 9.039e-017 |
| 4 | 2 | | 1 | -8.4 | -8.398 | -0.576 | 1.871 | -1.871 | 9.165e-007 |
| 4 | 2 | | 2 | 8.394 | -8.396 | -7.541e-005 | 1.953 | 1.953 | -0.007 |
| 4 | 2 | | 4 | -1.546 | -1.546 | 0.049 | 0.287 | -0.287 | -4.889e-007 |
| 4 | 2 | | 5 | 1.54 | -1.54 | 1.892e-006 | 0.297 | 0.297 | -0.005 |
| 4 | 2 | | SD | 12.074 | 12.074 | 0.578 | 2.736 | 2.736 | 0.008 |
| 4 | 2 | | LN+SD | -12.077 | -12.077 | -1.07 | -2.995 | 2.995 | 0.008 |
| 4 | 3 | 1 | | -0.003 | -0.003 | -0.492 | -0.259 | 0.259 | 9.039e-017 |
| 4 | 3 | | 1 | -11.881 | -11.878 | -0.815 | 2.646 | -2.646 | 1.296e-006 |
| 4 | 3 | | 2 | 0.002 | -0.002 | -1.395e-008 | 3.614e-004 | 3.613e-004 | -1.306e-006 |
| 4 | 3 | | 4 | -2.186 | -2.186 | 0.069 | 0.406 | -0.406 | -6.914e-007 |
| 4 | 3 | | SD | 12.081 | 12.078 | 0.818 | 2.677 | 2.677 | 1.098e-005 |
| 4 | 3 | | LN+SD | -12.084 | -12.081 | -1.309 | -2.936 | 2.937 | 1.098e-005 |
| 4 | 4 | 1 | | -0.003 | -0.003 | -0.492 | -0.259 | 0.259 | 9.039e-017 |
| 4 | 4 | | LS | -0.141 | -5.189e-005 | -0.005 | -0.001 | -0.032 | 6.126e-005 |
| 4 | 4 | | LN+LS | -0.144 | -0.003 | -0.496 | -0.26 | 0.227 | 6.126e-005 |
| 4 | 4 | | 1 | 0.046 | 0.046 | 0.003 | -0.01 | 0.01 | 1.526e-010 |
| 4 | 4 | | 2 | 0.046 | -0.046 | 7.81e-009 | 0.011 | 0.011 | -3.898e-005 |
| 4 | 4 | | 3 | -0.024 | 0.024 | 6.823e-011 | -0.005 | -0.005 | -0.004 |
| 4 | 4 | | 4 | 0.005 | 0.005 | -1.439e-004 | -0.001 | 0.001 | 7.024e-011 |
| 4 | 4 | | 5 | 0.005 | -0.005 | 1.36e-007 | 0.001 | 0.001 | -1.327e-005 |
| 4 | 4 | | SD | 0.1 | 0.024 | 0.003 | 0.005 | 0.022 | 0.004 |
| 4 | 4 | | LN+LS+SD | -0.244 | -0.027 | -0.499 | -0.265 | 0.25 | 0.004 |
| 4 | 5 | 1 | | -0.003 | -0.003 | -0.492 | -0.259 | 0.259 | 9.039e-017 |

Рис. 28.5-2. *Фрагмент таблицы «Перемещения» для нелинейной задачи*

Если был проведен расчет физически нелинейной системы, то операции  (**Повреждения и разрушения**) и  (**Суммарные повреждения и разрушения**), которые доступны в закладках **Эпюры усилий** и **Поля напряжений**, позволяют получить цветовую шкалу элементов, в которых возникли те или иные критические события. Они могут характеризоваться как повреждениями, так и разрушениями.

- Первые характеризуются неупругим состоянием материала (текучестью) и возможностью в таком состоянии участвовать в работе сечения.
- Вторые связаны с превышением предельно допустимых значений деформаций и предполагают выключение из работы.

При этом важно помнить, что для выполнения этих операций оболочечные конечные элементы разбиваются на слои (по умолчанию 20), а поперечное сечение стержневых конечных элементов на треугольники (по умолчанию площадь каждого треугольника составляет 5% от площади сечения). Критические события характеризуют состояние слоя, треугольного участка сечения или же одного из арматурных стержней.

Лишь в тех случаях, когда повреждения стали такими, что конечный элемент стал неработоспособным, он исключается из расчетной модели. Но для статически неопределимых систем и это не всегда означает разрушение конструкции.

Разница, между описанными выше операциями состоит в том, что определенное повреждение (текучесть материала) может возникнуть в некоторый момент $t_1$ времени и исчезнуть в момент времени $t_2$. При этом на шкале  (в отличии от шкалы  ) при $t>t_2$ это повреждение отображаться не будет.

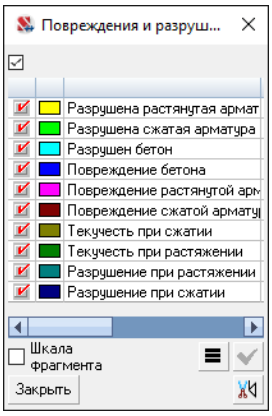



Рис. 28.5-3. *Цветовая шкала* ***Повреждения и разрушения***

Операция  позволяет получить в табличной форме информацию аналогичную той, которая доступна по кнопке  **(Суммарные повреждения и разрушения)**.

### История нелинейного загружения

Для контроля истории нелинейного загружения элементов и узлов используется одноименная операция, которая вызывается из диалоговых окон **Информация об элементе** и **Информация об узле** соответственно.

## 28.6. Литература к главе Нелинейные Расчеты в Системе SCAD


1. Безухов Н. И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести. — М.:Высшая школа, 1961. — 532 с.
2. Гениев Г. А., Киссюк В. Н., Тюпин Г. А. Теория пластичности бетона и железобетона. —М.: Стройиздат, 1974. — 306 с.
3. Григолюк Э.И., Шалашилин В.И., Проблемы нелинейного деформирования. — М.: Наука, 1988.
4. Ильюшин А. А. Пластичность. Часть первая. Упруго-пластические деформации. — М.-Л.: ОГИЗ, 1948. — 376 с.
5. Клованич С. Ф., Метод конечных элементов в нелинейных задачах инженерной механики — Запорожье: ООО «ИПО», 2009. — 400 с.
6. Новожилов В.В., Теория упругости.— Судпромгиз, 1958.— 370 с.
7. Перельмутер А.В., Сливкер В.И., Расчетные модели сооружений и возможность их анализа.— М.:ДМК Пресс, 2007. – 600 с., ил.
8. Перельмутер А.В., SCAD Office. Расчет мачт на оттяжках. — Киев: ООО SCAD Soft, — 47 с.:ил.
9. Перельмутер А.В., Тур В.В., Готовы ли мы перейти к нелинейному анализу при проектировании ? International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, 2017, **13**(3), 86-102.
10. Фиалко С.Ю., Применение метода конечных элементов к анализу прочности и несущей способности тонкостенных железобетонных конструкций с учетом физической нелинейности — М.:АСВ, SCAD Soft, 2018. — 256 стр.
11. Bathe K. J., Walczak J.,Welch A., Mistry N. Nonlinear analysis of concrete structures. Computers & Structures, 1989, **32**, 563 – 590.
12. Criesfield M. A. Non-linear finite element analysis for solids and structures. Volume 1: Essentials. — John Wiley & Sons Ltd, Chichester New York …, 2000.
13. Criesfield M. A. Non-linear finite element analysis for solids and structures. Volume 2: Advanced topics. — John Wiley & Sons Ltd, Chichester New York …, 2000.

# 29. Амплитудно-частотные характеристики

При установке на конструкции оборудования и машин, создающих периодические нагрузки (машин с вращающимися частями, кривошипно-шатунными механизмами и т. п.), амплитуда некоторого перемещения или внутреннего усилия зависит как от частот собственных колебаний конструкции $\omega_i$ ($i = 1, \ldots, n$), так и от частоты $\theta$ возмущающей силы

$$P = P_0 \sin(\theta t).$$

Амплитудное значение $P_0$ гармонической нагрузки определяется заданием на проектирование и зависит от конструкции того оборудования, которое вызывает эту нагрузку. При отсутствии точных данных можно воспользоваться рекомендациями СНиП 2.02.05-87 «Фундаменты машин с динамическими нагрузками» и принять

$$P_0 = \mu \sum_{k=1}^{m} Q_k ,$$

где $Q_k$ — вес каждого ротора машины, а коэффициент $\mu$ определяется по таблице 29-1:

**Таблица 29-1**

| Тип машины | Коэффициент $\mu$ |
|---|---|
| Турбомашины | 0,20 |
| Электрические машины с числом оборотов $n_{об}$ в минуту:<br>свыше 750<br>от 750 до 500<br>менее 500 | <br>0,20<br>0,15<br>0,10 |
| Центрифуги с диаметром ротора $d$, м | $d\,(n_{об}/1000)^2$ |
| Центробежные насосы | 0,15 |
| Дымососы и вентиляторы | $0{,}8\,(n_{об}/1000)^2$,<br>но не менее 0,20 |

В силу неточности определения частот собственных колебаний, вызванной как приближенным представлением расчетной схемы, так и ошибками округления при арифметических вычислениях, а также возможной нестабильностью круговой частоты возмущения $\theta$, достигающей 10%, возникает необходимость в оценке поведения системы при изменении частоты $\theta$ в некотором диапазоне от $\theta_1$ до $\theta_2$. В особенности это может оказаться важным при значениях $\theta$, приближающихся к одной из собственных частот $\omega_i$ (околорезонансный режим), что может произойти при пуске или остановке машины. Зависимость амплитудного значения некоторой компоненты напряженно-деформированного состояния (перемещения, напряжения, внутреннего усилия) от частоты возмущения $\theta$ называется *амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ)*. Она определяется расчетом системы на гармоническое воздействие при частотах возмущающей силы, меняющихся в заданном интервале. Амплитудное значение силы $P_0$ остается при этом неизменным.

## 29.1. Подготовка исходных данных

Информация для расчета задается в разделе **Специальные исходные данные** (**Дерево проекта**) обращением к операции **Амплитудно-частотные характеристики**. Кроме того, эта информация может быть задана в препроцессоре (закладка **Специальные**). В этом случае, если пользователь предварительно выполнил селекцию узлов, то в списке групп узлов (см. ниже) появится пункт *Селектированные*.

Исходные данные для расчета АЧХ включают:

- группу нагрузок, содержащую одну или несколько гармонических нагрузок $P_0$, приложенных к узлам и/или элементам расчетной схемы;
- специальные данные, которые вводятся в диалоговом окне **Амплитудно-частотные характеристики** (рис. 29.1-1).



**Следует отметить, что в одну группу могут входить только синхронные (совпадающие по частоте) и синфазные (совпадающие по фазе) гармонические нагрузки.**

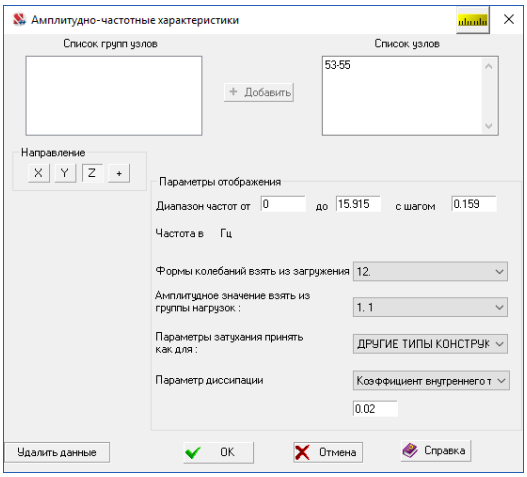



Рис. 29.1-1. *Диалоговое окно* **Амплитудно-частотные характеристики**

В диалоговом окне задаются следующие данные:

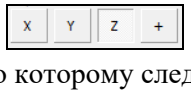
- список групп узлов, для которых вычисляются АЧХ, или список номеров этих узлов;
- направление, вдоль которого определяются компоненты перемещения (X, Y, Z), или признак полного перемещения (+);
- значение максимально допустимой амплитуды, которое указывается на графике с результатами расчета (можно не задавать);
- нижняя и верхняя границы частоты (диапазон частот), для которых выполняется расчет;
- шаг разбиения диапазона частот, используемый при определении амплитуд (при густом спектре собственных частот шаг следует уменьшать). Желательно, чтобы между каждой парой собственных частот располагалось 3–4 шага разбиения;
- коэффициент внутреннего трения.

Кроме того, из списков следует выбрать номер загружения, где определялись формы собственных колебаний, и группу нагрузок.

Расчет выполняется после подготовки всех данных и активации соответствующего пункта в дереве проекта.

## 29.2. Результаты расчета

Результаты расчета в виде набора графиков АЧХ заданных узлов отображаются в диалоговом окне **Амплитудно-частотные характеристики** (рис. 29.2-1).

Окно содержит список узлов, для которых вычислены амплитудно-частотные характеристики. В списке возле каждого номера узла расположен маркер, включение или отключение которого позволяет управлять отображением графика для соответствующего узла. Маркер **Все узлы** предназначен для включения/отключения отображения графиков для всех узлов. Отдельная группа кнопок **Направление** 

позволяет выбрать направление (X, Y, Z или полное — кнопка с символом +) АЧХ по которому следует отрисовать.

Если необходимо сузить или расширить диапазон анализируемых частот, то следует активировать одноименный маркер и задать в полях редактирования **от** и **до** границы нового диапазона.

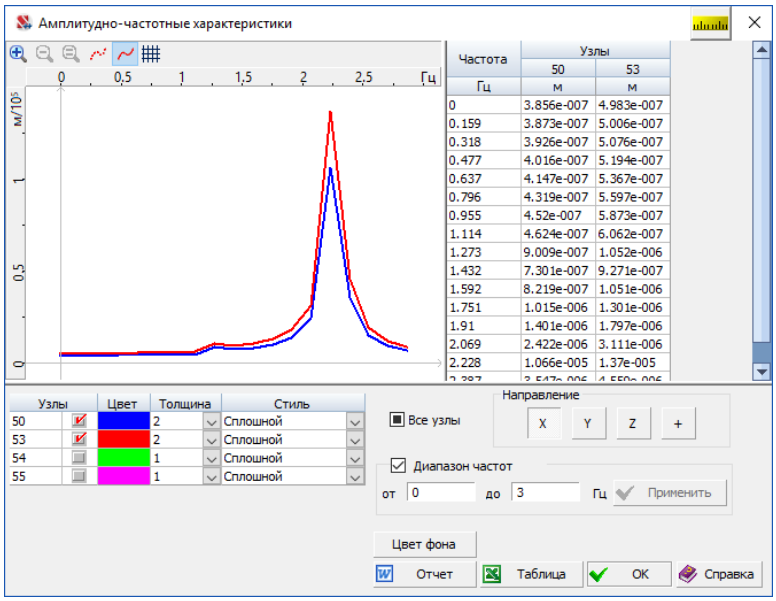



Рис. 29.2-1. *Диалоговое окно с результатами расчета* АЧХ

Кнопки **Отчет** и **Таблица** позволяют сформировать отчет в формате текстового процессора или получить таблицу Excel.

Если установить курсор в поле графика, то рядом с курсором появится информационное поле со значениями в точке указания курсором, что позволяет динамически исследовать график.

Для каждого типа данных можно изменить цвет, толщину и стиль линии, а также с помощью кнопки **Цвет фона** изменить фон, на котором отображаются графики.

# 30. Спектры ответа

Спектр ответа – совокупность значений максимальных абсолютных или относительных ответных ускорений линейного осциллятора при заданном акселерограммой воздействии с учетом собственной частоты демпфирования осциллятора. Как правило, их используют при проектировании атомных станций (см. п.5.2 Норм проектирования сейсмостойких атомных станций НР-031-01).

## 30.1. Расчет на сейсмические воздействия

Рассматриваются колебания линейных дискретных систем со многими степенями свободы, полученные из любых континуальных или комбинированных систем после применения к ним процедуры дискретизации метода конечных элементов. При этом решается система обыкновенных дифференциальных уравнений

$$[M]\{\ddot{u}\}+[K]\{u\}=\{0\}, \tag{30.1.1}$$

где {u} — вектор перемещений;

[M] — матрица массы;

[K] — матрица жесткости.

Вынужденные колебания линейной дискретной системы с сопротивлением, пропорциональным скорости (т. н. вязкое затухание по гипотезе Фойгта-Кельвина), описываются системой обыкновенных дифференциальных уравнений

$$[M]\{\ddot{u}\}+[C]\{\dot{u}\}+[K]\{u\}=\{F(t)\}, \tag{30.1.2}$$

где [C] — матрица диссипации энергии;

{F(t)} — вектор нагрузки.

В случае кинематического возмущения в качестве нагрузки выступают переносные силы инерции и система уравнений (30.1.2) записывается в виде

$$[M]\{\ddot{u}\}+[C]\{\dot{u}\}+[K]\{u\}=-[M]\{I\}\ddot{x}_0(t), \tag{30.1.3}$$

где {u} — вектор относительных перемещений (например, в системе координат XOY, связанной с основанием);

{I} — вектор, компонентами которого являются косинусы углов между направлениями перемещений по координатам и вектором ускорения основания;

$\ddot{x}_0(t)$ — ускорение основания.

Решение уравнения (30.1.3) отыскивается в виде разложения его по формам собственных колебаний системы (так называемая «модальная суперпозиция»)

$$\{u\}=\sum_{j=1}^{n}\{\Phi_j\}\Psi_j(t), \tag{30.1.4}$$

где $n$ — число степеней свободы системы (учитываемых собственных чисел и векторов);

$\Phi_j$ — $j$-я форма собственных свободных колебаний дискретной системы;

$\Psi_j(t)$ — неизвестные функции времени, которые необходимо определить.

Предположим, что для матрицы диссипации [C] выполняется условие:

$$\{\Phi_i\}^T[C]\{\Phi_j\}=\begin{cases}0, & i\neq j\\ 2\phi_i\omega_i\{\Phi_i\}^T[M]\{\Phi_i\}, & i=j\end{cases},$$

где $\omega_i$ — $i$-я собственная частота дискретной системы.

После подстановки (30.1.4) в (30.1.3) и умножения (30.1.3) на вектор $\{\Phi_i\}^T$ для нахождения $\Psi_j(t)$ получаем дифференциальное уравнение

$$\ddot{\Psi} + 2\phi_i\omega_i\dot{\Psi}_i + \omega_i^2\Psi_i = -D_i\ddot{x}_0(t)\,, \qquad (30.1.5)$$

где

$$D_i = \frac{\{\Phi_i\}^T[M]\{I\}}{\{\Phi_i\}^T[M]\{\Phi_i\}}\ddot{x}_0(t)\,.$$

Для определения инерционных нагрузок на конструкцию необходимо знать ускорения ее точек:

$$\{\ddot{u}_a\} = \{\ddot{u}\} + \{I\}\ddot{x}_0(t) = \sum_{i=1}^{n}\{\Phi_i\}\left(\ddot{\Psi}_j(t) + D_i\ddot{x}_0(t)\right) = \sum_{i=1}^{n}\{\Phi_i\}\ddot{\Psi}_{ja}(t)\,.$$

Сейсмические колебания дискретных систем описываются системами дифференциальных уравнений с несколько более общим видом правой части:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = -[M]\,(\{\dot{I}_x\}\ddot{x}_0(t) + \{\dot{I}_y\}\ddot{y}_0(t) + \{\dot{I}_z\}\ddot{z}_0(t), \qquad (30.1.6)$$

где $\ddot{x}_0(t)$, $\ddot{y}_0(t)$ и $\ddot{z}_0(t)$ — компоненты расчетной акселерограммы.

Если какая-либо из компонент не учитывается, то соответствующая часть нагрузки из (30.1.6) исключается.

## 30.2. Акселерограммы и спектры ответа

При анализе сейсмостойкости оборудования необходимо определить действующие на него инерционные сейсмические нагрузки. Принят метод раздельного рассмотрения сейсмических колебаний здания и оборудования с использованием акселерограмм и спектров, рассчитанных для точек крепления оборудования.

Расчет производится следующим образом:

- определяются (вычисляются) вынужденные колебания сооружения при сейсмическом воздействии, заданном расчетной акселерограммой на грунте;
- определяются законы изменения ускорений выбранных точек конструкции;
- принимая акселерограммы в качестве возмущающего воздействия, рассчитываются вынужденные линейные колебания линейных неконсервативных осцилляторов и находятся зависимости модулей их максимальных абсолютных или относительных ускорений от их собственных частот и коэффициентов диссипации.

Таким образом, для каждой исследуемой точки решается уравнение (30.1.2), в котором:

- зафиксирован коэффициент диссипации φ;
- нагрузкой является вычисленное возмущающее воздействие от расчетной акселерограммы;
- наборы собственных частот осцилляторов при расчете спектра ответа зафиксированы и приведены в таблице 30.2-1.

К приведенным в таблице 30.2-1[1] значениям частот неконсервативных осцилляторов добавляются еще собственные частоты рассчитываемой конструкции. Это делается для того, чтобы учесть возможность резонанса с ними.

**Таблица 30.2-1**

| Частотный диапазон, Гц | Приращения, Гц |
|---|---|
| 0,2…3,0 | 0,10 |
| 3,0…3,6 | 0,15 |
| 3,6…5,0 | 0,20 |
| 5,0…8,0 | 0,25 |
| 8,0…15,0 | 0,5 |
| 15,0…18,0 | 1,0 |
| | 2,0 |

[1] Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures and Commentary on Standard for Analysis of Safety-Related Nuclear Structures // *ASCE Standard*, Sept. 1986

| Частотный диапазон, Гц | Приращения, Гц |
|---|---|
| 18,0…22,0<br>22,0…34,0 | 3,0 |

Для каждого указанного осциллятора находятся решения на всем диапазоне действия акселерограммы, и выбирается максимальное по абсолютной величине, которое и является спектром ответа данной точки на действие данной акселерограммы.

## 30.3. Ввод данных и анализ результатов

Информация для расчета задается в разделе **Специальные исходные данные** (**Дерево проекта**) обращением к операции **Спектры ответа**. Кроме того, эта информация может быть задана в препроцессоре (закладка **Специальные**). В этом случае, если пользователь предварительно выполнил селекцию узлов, то в списке групп узлов (см. ниже) появится пункт *Селектированные*.

Диалоговое окно постпроцессора **Спектры ответа** (рис. 30.3-1) содержит список узлов, для которых необходимо вычислить спектры (номера узлов задаются в поле **Список узлов** с разделителем «пробел»).

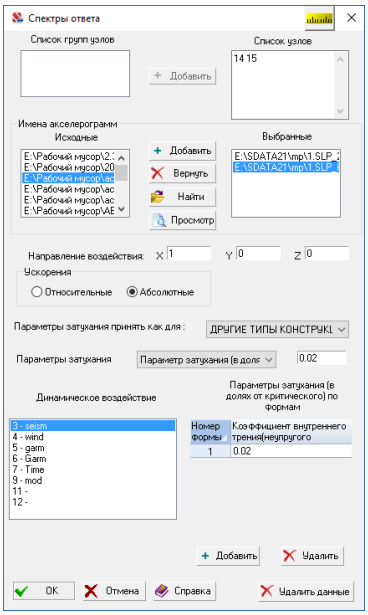



Рис. 30.3-1. *Диалоговое окно* **Спектры ответа**

Акселлерограммы загружаются в список **Исходные** кнопкой **Найти**. Имена акселерограмм, по которым необходимо выполнить расчеты спектров, отмечаются в списке **Исходные** и переносятся кнопкой **Добавить** в список используемых в расчете — **Выбранные**. Убрать акселерограмму из списка **Выбранные** можно кнопкой **Вернуть**. Кроме того, для расчета необходимо:

- назначить направления действия;
- выбрать нужный тип спектров (абсолютные или относительные ускорения);
- в одноименном поле задать значение коэффициента диссипации;
- если коэффициент диссипации вводится для каждой формы, то его значения задаются через пробел в одноименном поле ввода; в том случае, когда значений коэффициента задано меньше, чем полученных форм колебаний, последнее из введенных значений распространяется на все оставшиеся формы;
- в списке **Динамическое воздействие** отметить загружение, из которого берутся собственные формы колебаний.

Если в списке **Выбранные** отмечена одна (и только одна) акселерограмма, то кнопка **Просмотр**  позволяет произвести предварительный просмотр этой акселерограммы.

Расчет выполняется после подготовки всех данных и активации соответствующего пункта в дереве проекта.

Просмотр результатов и их документирование выполняется в диалоговом окне (рис. 30.3-2), которое может быть вызвано из дерева проекта.

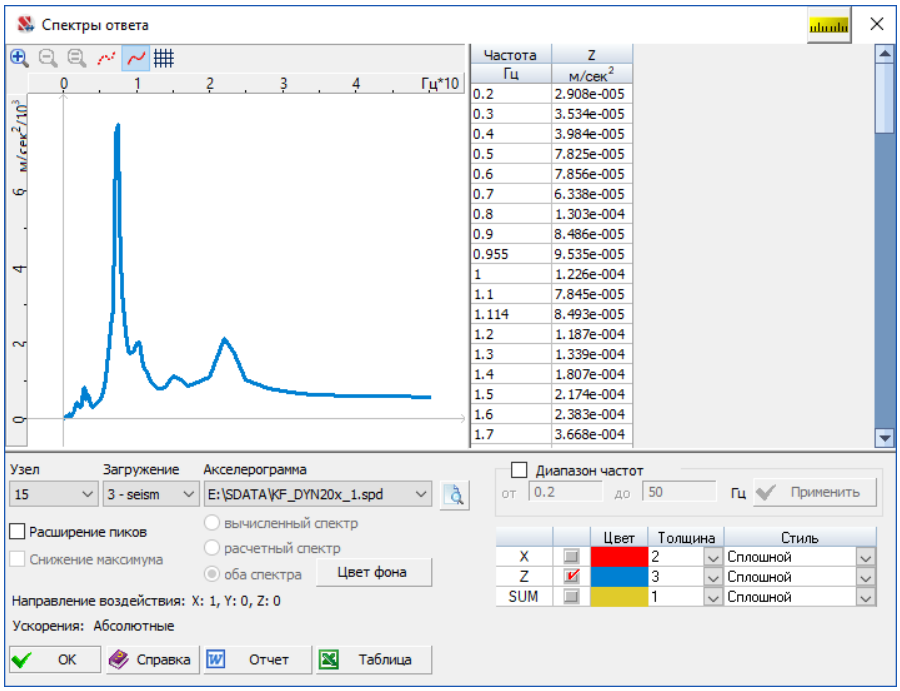



Рис. 30.3-2. *Диалоговое окно* **Спектры ответа**

Для построения спектров рекомендуется следующий порядок действий:

- в списке **Узел** выбрать номер узла, для которого строятся спектры;
- в списке **Загружение** отметить строку с номером загружения;
- в списке **Акселерограмма** выбрать нужное имя;
- в полях **от** и **до Диапазона частот** задать минимальное и максимальное значения частот, для которых определяется спектр;
- с помощью маркеров назначить направления действия, для которых строятся графики спектров ответа (строка SUM позволяет получить график суммарного ускорения).

Кнопка  позволяет произвести предварительный просмотр выбранной акселерограммы.

Если на экране производится визуализация только одного графика спектра ответа, программа позволяет произвести процедуры расширения пиков и снижения максимумов (см. [1, глава 7]). При этом пользователь может выбрать, какие графики следует выводить на экран (вычисленный спектр, расчетный спектр или оба спектра).

Кнопки **Отчет** и **Таблица** позволяют сформировать отчет в текстовом формате или получить таблицу MS Excel.

Если установить курсор в поле графика, то рядом с курсором появится информационное поле со значениями факторов в точке указания курсором, что позволяет динамически исследовать график.

Для каждого типа данных можно изменить цвет, толщину и стиль линии, а также с помощью кнопки **Цвет фона** изменить фон, на котором отображаются графики.

## 30.4. Подготовка файлов акселерограмм

В составе комплекса **SCAD** поставляются для примера четыре стандартные акселерограммы. После завершения инсталляции их файлы с расширением **.spc** находятся в корневом каталоге системы **SCAD Office**.

Для того чтобы воспользоваться этими файлами, их следует скопировать в каталог с исходными данными. В этот каталог следует помещать и другие акселерограммы.

Задание акселерограмм в виде текстовых файлов с указанным расширением приведено в разделе 0. Для этих целей можно воспользоваться программой **Редактор акселерограмм**, описание которой приведено в разделе 34.8.

## 30.5. Литература к главе Спектры Ответа

1. Бирбраер А.Н., Расчет конструкций на сейсмостойкость. Санкт-Петербург. — Наука. — 1998г. — 255 с.

# 31. Линии и поверхности влияния

Линии и поверхности влияния это графики, ординаты которых выражают значение перемещения в данной точке или внутреннего усилия в элементе, в зависимости от положения движущейся по конструкции сосредоточенной единичной силы постоянного направления.

При построении линии влияния предполагается, что единичная сила движется вдоль некоторой заранее заданной грузовой области. В качестве возможных положений единичной силы может быть задана вся схема, группа узлов или маршрут движения.

## 31.1. Создание маршрутов движения



В этом разделе рассматриваются операции создания и корректировки маршрутов движения.

Маршрут движения представлен набором узлов, следующих в определенном порядке. Для удобства представления маршрутов в графическом редакторе узлы соединены отрезками, которые не рассматриваются как самостоятельные объекты и не влияют на характеристики расчетной схемы. Маршрут является вспомогательным элементом (тип 1102), который может быть сформирован как при создании расчетной схемы, так и присоединен к схеме с использованием операции сборки.

### Создание маршрута и его привязка к существующей модели

При формировании маршрута путем привязки его узлов к существующим узлам расчетной схемы рекомендуется придерживаться следующей очередности выполнения операций:

- активировать операцию нажатием кнопки **Маршрут движения** в инструментальной панели **Загружения** и выбрать в выпадающем меню способ задания — путем выбора узлов в порядке их следования (**Создать новый маршрут движения**) или выбора стержневых элементов схемы, совпадающих с отрезками маршрута (**Создать новый маршрут движения из отмеченных стержней**);
- в случае выбора первой операции в появившемся диалоговом окне (см. рис. 31.1-1) задать наименование маршрута (поле **Имя**) и выйти из окна нажатием кнопки **ОК**;

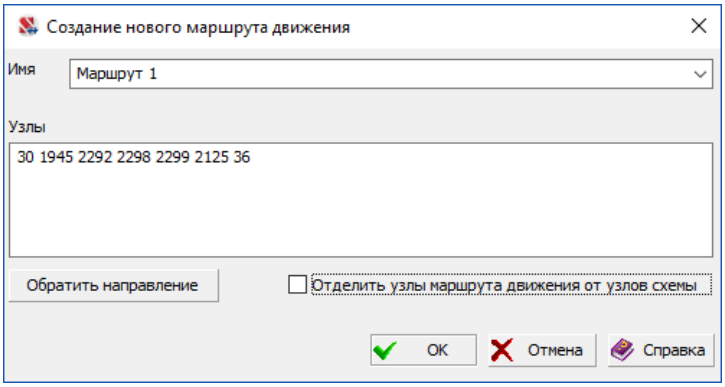



Рис. 31.1-1 *Диалоговое окно* **Создание нового маршрута движения**

- поочередно, в порядке их следования, с помощью «резиновой нити» выбрать на схеме узлы и нажать кнопку **ОК** в инструментальной панели **Загружения** (курсоры для одновременного выбора нескольких узлов в виде «рамки» и «полигона» не используются, т.к. не обеспечивают в общем случае однозначного определения очередности их следования);
- аналогичный порядок действий будет при использовании операции **Создать новый маршрут из отмеченных стержней**; в диалоговом окне **Создание нового маршрута** задается имя, после выхода из окна отмечаются стержневые элементы и нажимается кнопка **ОК** в инструментальной панели **Схема** (очередность выбора стержней значения не имеет, т.к. предполагается, что отрезки, соединяющие соседние узлы маршрута, образуют неразрывную ломаную).

### Особенности реализации

В случае, когда выбраны стержневые элементы, не образующие неразрывную ломанную, программа выдает сообщение. Решение о создании на базе одного набора выбранных стержней нескольких маршрутов принимает пользователь. При получении утвердительного ответа на запрос о возможности создания нескольких маршрутов они формируются автоматически. Каждый маршрут получает имя, заданное при активации операции, дополненное номером в порядке создания элемента. Исходное имя получает первый по очередности создания маршрут.

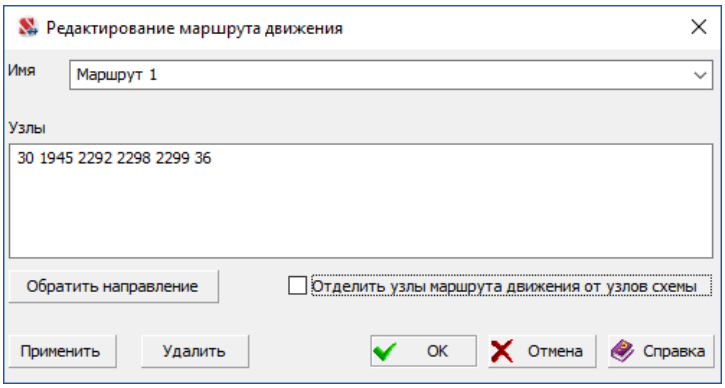



Рис. 31.1-2. *Диалоговое окно* **Редактирование маршрута движения**

## 31.2. Подготовка данных для расчета линий и поверхностей влияния

Для расчета и отображения линий и поверхностей влияния в дереве проекта следует задать исходные данные — выбрать нужные маршруты, группы узлов и/или указать в качестве грузовой области всю схему (рис. 31.2-1)

По умолчанию вычисление линий и поверхностей влияния производится в предположении, что единичные силы действуют вертикально (вдоль глобальной оси Z), но при задании исходных данных можно выбрать и другое направление.

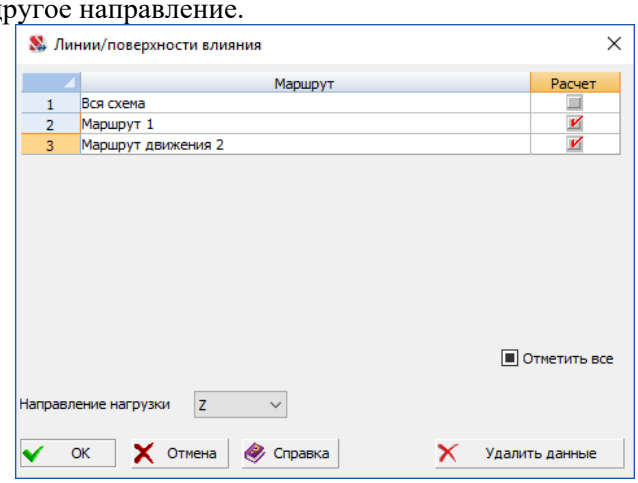



Рис. 31.2-1. *Диалоговое окно* **Линии/поверхности влияния**

## 31.3. Расчет

Для вычисления линий и поверхностей влияния следует в дереве проекта (раздел *Расчет*) выбрать пункт *Линии и поверхности влияния*. Перед этим должен быть выполнен обычный линейный расчет. Отметим, что вычисление с помощью итерационного солвера в данном случае нецелесообразно, поэтому **SCAD** блокирует этот вид расчета, если в опциях расчета выбран итерационный метод.

При расчете используются усилия/напряжения в центрах элементов.

## 31.4. Графическое отображение результатов расчета линий и поверхностей влияния



Для графического отображения результатов расчета линий и поверхностей влияния используется режимы **Поверхности влияния перемещений**  (рис. 31.4-1) и **Поверхности влияния усилий/напряжений (**рис. 31.4-2**)** в разделе **Постпроцессоры** инструментальной панели.

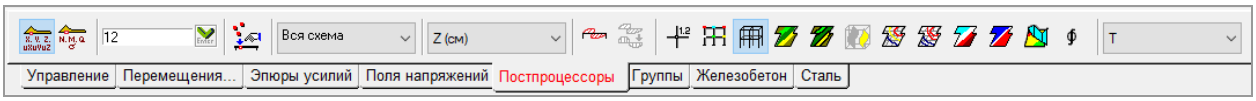



Рис. 31.4-1. *Инструментальная панель, режим* **Поверхности влияния перемещений**

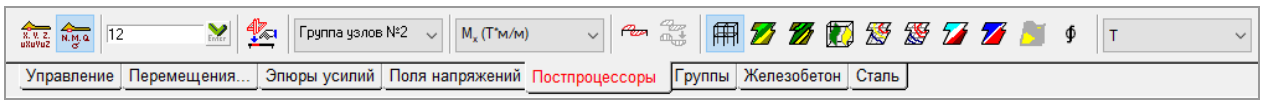
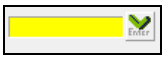



Рис. 31.4-2. *Инструментальная панель, режим* **Поверхности влияния усилий/напряжений**

Инструментальные панели включают следующие функции:

 — ввод номера узла/элемента;

 — выбор узла/элемента с помощью мыши;

 — отображение графиков линий влияния в стержнях;

 — смена оси отображения графиков;

 — вывод значений перемещений в узлах;

 — цветовая индикация величины перемещений в узлах;

 — отображение исходного состояния схемы.

 — отображение результатов в виде изополей;

 — отображение результатов в виде изополей и изолиний;

 — вывод изоповерхностей;

 — отображение результатов в виде изолиний;

 — отображение изолиний с заданным шагом;

 — отображение изополей с заданным шагом;

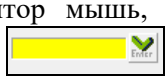
 — отображение изополей с выделенным значением;

 — построение графиков вдоль секущей;

 — вычисление площадей для линий влияния и объемов для поверхностей влияния.

Для того, чтобы произвести графический анализ результатов следует:

- выбрать нужную грузовую область (маршрут движения, группа узлов или пункт *Вся схема*) в соответствующем выпадающем списке;

- указать узел (в постпроцессоре **Поверхности влияния перемещений**) или элемент (в постпроцессоре **Поверхности влияния усилий/напряжений**), который будет анализироваться; это можно сделать используя манипулятор мышь, активировав операцию  (  ), или ввести нужный номер в поле ввода  и нажать на клавиатуре **Enter** (или кнопку **OK** расположенную рядом с полем ввода);
- выбрать в выпадающем списке анализируемый фактор (направление перемещения в случае поверхностей влияния перемещений или силовой фактор выбранного элемента в случае поверхностей влияния усилий/напряжений).

После этого станут доступны возможности отображений графиков (на стержнях или маршрутах движений), изополей/изолиний/изоповерхностей на пластинчатых и объемных элементах. Если в качестве грузовой области выбран маршрут движения, то можно отобразить только графики на маршруте. Большинство операций аналогично соответствующим операциям, которые используются для анализа напряженно-деформированного состояния.

Для отображения числовых значений фактора на изополях и изолиниях традиционно используется кнопка фильтров  . Значения могут выводиться в центрах элементов и в узлах. Для получения значений в узлах необходимо активировать соответствующую опцию в диалоговом окне **Настройка параметров среды** (вызывается из одноименного пункта в разделе меню ***Настройки***). Поскольку единичная сила (равная 1 Н) приводит к очень малым величинам перемещений/усилий/напряжений, которые неудобно анализировать, предусмотрена возможность задания величины "единичной силы" — в соответствующем выпадающем списке можно, например, выбрать пункт Т и получить оцифровку в предположении, что в каждом из узлов прикладывалась сила величиной 1 тонна.

Операция  предназначена для вычисления положительных и отрицательных значений площадей для линий влияния и объемов для поверхностей влияния. Результаты отображаются в диалоговом окне (рис. 31.4-3)

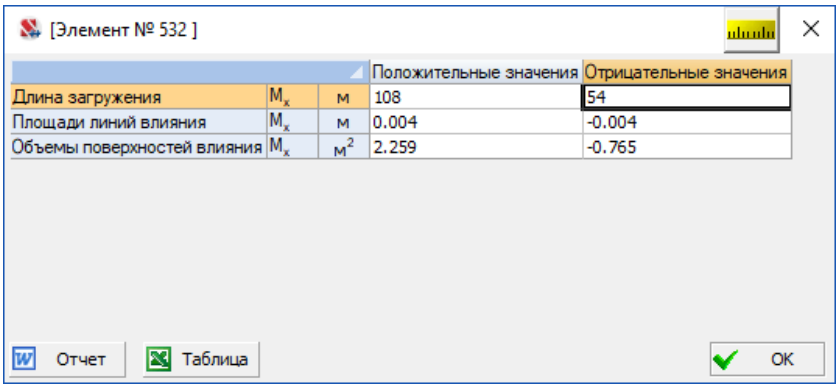



Рис. 31.4-3. Результаты вычислений площадей и объемов линий и поверхностей влияния.

# 32. Центры жесткости

## 32.1. Определение центра жесткости

В некоторых случаях возникает необходимость определения центра жесткости здания. Термин "центр жесткости" употребляется, например, при расчетах на сейсмические воздействия. Если центр жесткости не совпадает с центром масс, то появляются крутильные формы колебаний. Некоторые руководства по проектированию каркасов зданий рекомендуют располагать вертикальные диафрагмы с таким расчетом, чтобы центр жесткости находился поблизости от общего центра масс.

В зданиях, где объемно-планировочные и конструктивные решения меняются по высоте можно говорить о центре жесткости этажа. Центр жёсткости этажа определяется как точка, обладающая следующим свойством: если через нее проходит равнодействующая всех горизонтальных сил, то возникает только поступательное перемещение диска перекрытия и отсутствует его закручивание.

В соответствии с рекомендациями «Инструкции по определению расчетной сейсмической нагрузки для зданий и сооружений» (Москва, Госстройиздат, 1962) координаты центра жесткости определяется по формулам типа

$$x_0 = \frac{\sum_{i=1}^{n} G_{xi} x_i}{\sum_{i=1}^{n} G_{xi}}; \quad y_0 = \frac{\sum_{i=1}^{n} G_{yi} y_i}{\sum_{i=1}^{n} G_{yi}},$$

где $G_{xi}$ и $G_{yi}$ — жесткости вертикальных элементов этажа (стен, колонн, пилонов и т.п.) по направлению осей X и Y соответственно, а $x_i$ и $y_i$ — координаты центров рассматриваемых элементов.

## 32.2. Ввод исходных данных и расчет

Информация для расчета задается в разделе **Специальные исходные данные** (**Дерево проекта**) обращением к операции **Центры жесткости**. Кроме того, эта информация может быть задана в препроцессоре (закладка **Специальные**). В этом случае, если пользователь предварительно выполнил селекцию узлов, то в списке групп узлов (см. ниже) появится пункт *Селектированные*.

Исходные данные для расчета центра жесткости представляют собой списки элементов, составляющих каждый условный этаж. Ввод данных выполняется в диалоговом окне **Центры жесткости** (рис. 32.2-1).

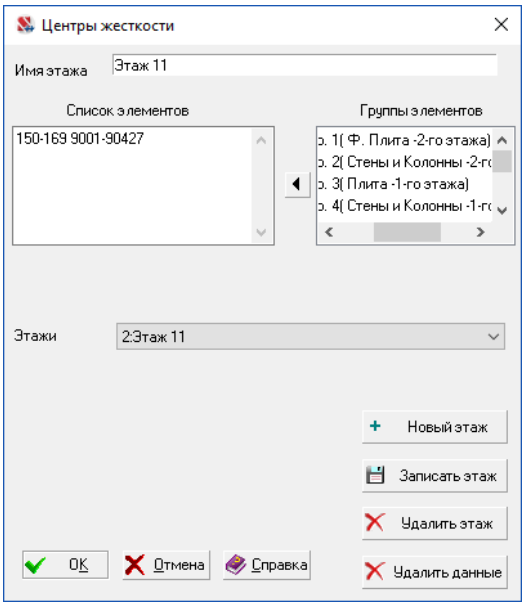



Рис. 32.2-1. *Диалоговое окно* **Центры жесткости**

Рекомендуется следующий порядок ввода:

- нажать кнопку **Новый этаж**;
- записать имя этажа в одноименном поле;
- в поле **Список элементов** задать номера элементов, принадлежащих текущему этажу. Если заранее были подготовлены группы элементов, включающие элементы этажа, то выбрать наименования таких групп и из одноименного поля перенести их (в виде набора элементов) в поле **Список элементов**;
- после ввода списка элементов текущего этажа сохранить его, нажатием кнопки **Запись этажа**;
- повторить все приведенные выше действия для ввода очередного этажа.

Для удаления информации об этаже следует выбрать наименование этажа в списке Этажи и нажать кнопку **Удалить этаж**.

Для удаления всех исходных данных, подготовленных для вычисления центра жесткости, используется кнопка **Удалить данные**.

Если при подготовке исходных данных использован препроцессор **ФОРУМ**, то в качестве групп элементов каждого этажа можно воспользоваться группами, сформированными в препроцессоре.

## 32.3. Анализ результатов



Эта операция позволяет для каждого этажа определить координаты X, Y и Z точки, в которой расположен центр жесткости. После активации операции на экране появляется диалоговое окно Определение центра жесткости, в котором приводится таблица со списком этажей и координатами центра жесткости.

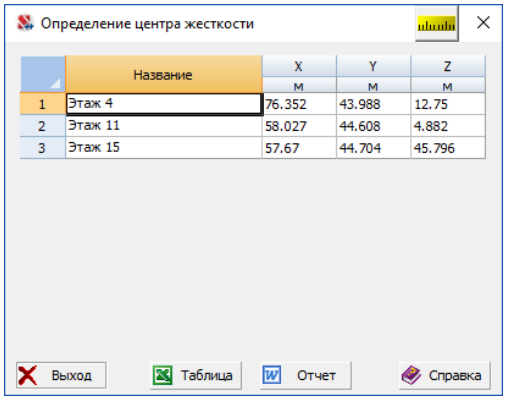



Рис. 32.3-1. *Диалоговое окно* **Определение центра жесткости**

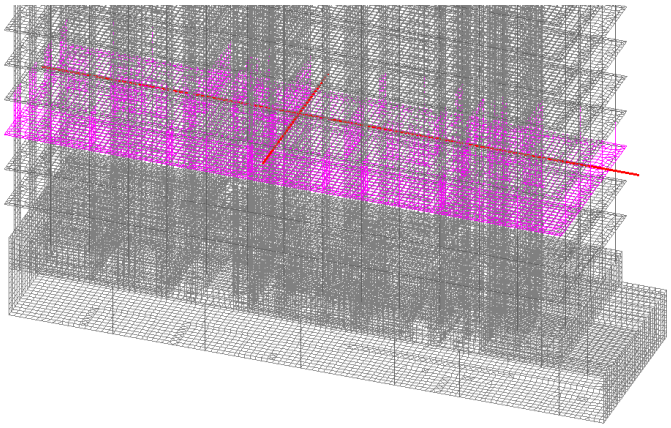


Рис. 32.3-2. *Расчетная схема с отображением центра жесткости*

Если указать курсором на строку с наименованием этажа, то на расчетной схеме отображаются две прямые, на пересечении которых лежит центр жесткости выбранного этажа. Одновременно, элементы выбранного этажа будут «подсвечены» на схеме фиолетовым цветом.

# 33. Язык архивации данных

Возможности современных средств вычислительной техники, развитые средства интерактивной машинной графики, а также быстродействующие численные методы решения систем линейных уравнений позволили создавать расчетные схемы, содержащие десятки тысяч узлов и элементов, а, значит, и увеличить в десятки раз размерности решаемых задач по сравнению с ранними версиями комплекса **SCAD**. Очевидно, что для таких расчетных схем проблематичным становится использование языковых средств описания параметров модели. Однако, учитывая наличие в архивах большого количества проектов, расчетные схемы которых подготовлены давно и описаны в текстовом формате, во всех современных версиях комплекса предусмотрена возможность импорта исходных данных в таком формате. Пользователь имеет возможность часть данных о конструкции подготовить в виде текстового файла, импортировать его и дополнить недостающие данные с помощью графического препроцессора **SCAD**. Отметим также, что текстовый файл позволяет воспользоваться дополнительными возможностями комплекса, которые еще не реализованы в его графическом препроцессоре.

## 33.1. Экспорт и импорт текстовых файлов с исходными данными

В комплексе **SCAD** последних версий сохранена возможность не только импорта, но и экспорта описания расчетной схемы в текстовом формате, что позволяет передать исходные данные в ***архив*** в виде, доступном для контроля. Начиная с версии 11.1, изменен синтаксис языка архивации данных. Это связано с тем, что предыдущая редакция была создана в конце 70-х годов и в настоящее время уже не может описать все особенности задания расчетной схемы.

Файл исходных данных в текстовом формате должен иметь расширение **.txt** и его, как и прежде, можно создать в текстовом редакторе. Для преемственности версий сохранен ввод исходных данных в текстовом формате в предыдущей редакции синтаксиса[1].

Отметим, что в этом формате программа поддерживает совместимость с предыдущими версиями только «снизу вверх», то есть в последние версии комплекса можно импортировать исходные данные, подготовленные для **SCAD** предыдущих версий, но не гарантируется возможность прямого импорта данных (без корректировки) из последних версий в предыдущие. Для того чтобы получить текстовый формат предыдущих версий, необходимо сначала сохранить проект версии 21.1 как проект версии 11.7, а уже затем в версии 11.5 или 11.7 сохранить его в текстовом формате.

В данной главе приведено описание архитектуры и синтаксиса языка архивации, который позволяет корректно и кратко описать расчетную схему, ее топологию, связи и нагрузки, использовать специфику библиотеки конечных элементов и т. д.

Расчетная схема представляет собой идеализированную модель конструкции (см. разд. 2). При использовании текстового ввода необходимо разбить модель на конечные элементы и вычертить схему; пронумеровать узлы; назначить опорные узлы и ввести в них соответствующие связи (запретить перемещения по каким-либо степеням свободы в узле либо ограничить перемещения узла конечными элементами, моделирующими работу связи); назначить элементам тип КЭ и тип жесткости. Нумерация узлов и элементов необходима для определения последовательности задания исходной информации на языке архивации и чтения результатов счета. Конечные элементы, имеющие одинаковые жесткостные характеристики, объединяются в жесткостные типы, номера которых на чертеже рекомендуется проставить у элемента.

Расчетная схема описывается в правой декартовой системе координат X, Y, Z, которая считается глобальной (или общей). Для задания координат узлов возможно использование не только декартовой, но и цилиндрической, сферической, тороидальной и других систем координат. Напомним, что величины перемещений узлов выдаются всегда в глобальной системе координат.

[1] См. главу 25 **Язык архивации данных** в предыдущих изданиях «SCAD Office. Вычислительный комплекс SCAD» 2004-2008г.г.

При расчете на динамические воздействия на расчетной схеме указываются расположение и величины весов масс сооружения и другие динамические параметры.

Каждый узел схемы в общем случае имеет 6 степеней свободы, которым присвоены следующие номера: 1, 2 и 3 — линейные перемещения соответственно вдоль осей X, Y и Z; 4, 5 и 6 — повороты вокруг осей X, Y и Z. Некоторые типы конечных элементов имеют до 15 степеней свободы.

Граничные условия в расчетной схеме могут быть заданы непосредственно (запрет перемещений: линейных — вдоль X, Y, Z; угловых — вокруг $U_X$, $U_Y$, $U_Z$ в любых сочетаниях в декартовой системе координат). Они могут быть также заданы при помощи связей конечной жесткости или при помощи специальных КЭ, позволяющих наложить связи по направлениям осей местных систем координат.

Статические воздействия (см. разд. 8.1) задаются в виде сосредоточенных сил и моментов в узлы расчетной схемы (узловые нагрузки) по направлениям общей системы координат, а также на элементы (местная нагрузка) в виде сосредоточенных и распределенных сил и моментов по направлениям местной или общей систем координат (см. разд. 3).

Динамические воздействия (см. разд. 0) задаются в виде узловых нагрузок. Массы сооружения задаются как собственный вес конструкций, оборудования и т. п.; при этом допускается использование как местных, так и узловых нагрузок.

При задании исходных данных могут быть задействованы различные системы единиц измерения. Базовыми единицами являются:

- **L** — длины (значение по умолчанию — метры);
- **F** — силы (значение по умолчанию — тонны силы);
- **s** — размеры сечений стержней (значение по умолчанию — сантиметры);
- **t°** — температуры (значение по умолчанию — градусы Цельсия).

Единицы измерения прочих величин являются производными от основных.

Единица измерения времени — секунда.

## 33.2. Архитектура и синтаксис языка архивации

Исходная информация разделена на отдельные документы в соответствии с таблицей 33.2-1.

**Сводная таблица документов исходных данных. Таблица 33.2-1**

| Наименование | Номер Документа | Характер информации |
|---|---|---|
| Заглавный | 0 | Общая информация: шифр, признак схемы, дробление элементов для выдачи усилий, система координат и т. п. |
| Элементы | 1 | Тип КЭ, тип жесткости и номера узлов для каждого элемента |
| Условия примыкания | 2 | Номер стержневого КЭ, номер его узла (1 — начало, 2 — конец) и номер степени свободы, по направлению которой снимается связь |
| Жесткостные характеристики | 3 | Набор жесткостных характеристик для определения каждого типа жесткости |
| Координаты | 4 | Три координаты каждого узла (декартовы, сферические, цилиндрические и т. п.) |
| Связи | 5 | Номера узлов и номера степеней свободы, по направлению которых перемещения запрещены внешними связями или перемещения объединяются (объявляются одинаковыми) |
| Характеристики загружений | 6 | Описание загружения, его имени, типа и данных динамики |
| Нагружения | 7 | Задание нагрузок в загружениях |
| Характеристики групп нагрузок | 9 | Задание имен групп нагрузок и некоторых их дополнительных характеристик |
| Группы нагрузок | 10 | Задание нагрузок в группах |
| Блоки в программе **ФОРУМ** | 12 | Перечни элементов, входящих в блоки **ФОРУМ**а |
| Вариации моделей | 14 | Списки схем, входящих в вариацию моделей |
| Моделирование загружения конструкции | 16 | Моделирование загружения конструкции при нелинейном расчете |
| Преднапряжения | 17 | Заданные преднапряжения в конечных элементах |
| Местные системы координат узлов | 19 | Для задания связей в местных системах координат узлов |

| Наименование | Номер Документа | Характер информации |
|---|---|---|
| Местные системы координат нагрузки | 20 | Для задания нагрузки в местных системах координат узлов |
| Координационные оси | 21 | Наименование и привязка осей |
| Характеристики нелинейного материала | 22 | Диаграммы нелинейности и др. |
| Контуры | 27 | Имя контура и перечень, принадлежащих ему узлов |
| Конструктивные элементы и их группы для проверки стальных конструкций | 28 | Параметры конструктивного элемента и список, составляющих его конечных элементов, списки конечных элементов, образующих группу |
| Унификация при проверке и подборе сечений из металлопроката | 29 | Имена унифицированных групп и списки конечных элементов, которые в них входят |
| Результаты подбора сечений из стального проката | 30 | Список сечений, предлагаемых по результатам подбора |
| Жесткие вставки | 31 | Величины жестких вставок |
| Положение главных осей инерции | 32 | Углы поворота главных или координатных осей инерции стержневых элементов, положение осей ортотропии для пластинчатых и объемных элементов |
| Системы координат вычисления усилий и напряжений | 33 | Местные системы координат для вычисления усилий и напряжений в пластинчатых и объемных элементах |
| Коэффициенты постели | 34 | Коэффициенты постели для всех типов элементов |
| Комбинации загружений | 36 | Коэффициенты, с которыми загружения входят в комбинацию |
| Анализ устойчивости | 37 | Виды анализируемых характеристик, параметры и список загружений (комбинаций загружений) для которых выполняется расчет |
| Главные и эквивалентные напряжения | 38 | Номер вида расчета и номер теории прочности, в соответствии с которой вычисляются напряжения |
| Нагрузки от фрагмента схемы | 39 | Список элементов, с которых собираются нагрузки на фрагмент, угол ориентации фрагмента, список узлов, на которые передаются нагрузки |
| Группы элементов | 47 | |
| Группы узлов | 48 | |
| Армирование сечений ж/б элементов | 53 | Данные для формирования: параметры групп, списки элементов |
| Спектры ответа | 59 | |
| АЧХ | 60 | |
| РСУ | 61 | |
| Список элементов РСУ | 62 | |
| Группы в РСУ | 63 | |
| Унификация в РСУ | 64 | |
| Данные о прогрессирующем обрушении | 70 | |
| Нагрузки при прямом интегрировании | 71 | |
| Данные о монтаже | 72 | |
| Связи на этапах монтажа | 1005, 2005, … | Связи на этапе монтажа, номер которого задан первой частью числа |
| Условия примыкания на этапах монтажа | 1002, 2002, … | |
| Коэффициенты постели на этапах монтажа | 1034, 2034, … | Коэффициенты постели на этапе монтажа, номер которого задан первой частью числа |
| Коэффициенты изменения жесткостей на этапах монтажа | 1073, 2073, … | Коэффициенты изменения жесткостей на этапе монтажа, номер которого задан первой частью числа |
| Заданное армирование плит | 74 | |
| Заданное армирование стержней | 75 | |
| РСУ для нелинейного расчета | 81 | |
| Список элементов РСУ для нелинейного расчета | 82 | |
| Группы в РСУ для нелинейного расчета | 83 | |
| Унификация в РСУ для нелинейного расчета | 84 | |

Информация в документах является в основном цифровой — действительные и целые числа. Кроме того, имеются алфавитные включения типа **R** (оператор повторения) и идентификаторы — ключевые слова данных, например, **AX** (жесткая вставка по оси $X_1$) и т. п.

При задании исходной информации соблюдаются следующие правила:

- каждый документ имеет свой номер и заключается в круглые скобки;
- «(» — символ начала документа;
- «)» — символ конца документа;
- стоящая между символами «) (» информация не воспринимается — считается комментарием;
- за символом «(» следует номер документа, отделяемый от последующей информации символом «/» (косая черта);
- информация в документах разделяется на строки. За номером документа следует собственно информация. Строка завершается символом «/» — косая черта;
- строка, начинающаяся с символа «*», считается комментарием;
- каждый документ может иметь свою структуру строк, описание которой приведено в соответствующем разделе;
- числа и используемые текстовые вставки, помещаемые в строке, отделяются друг от друга одним или несколькими пробелами;
- дробная часть числа от целой отделяется десятичной точкой;
- текстовые переменные, содержащие специальные символы, необходимо выделять кавычками;
- документы могут следовать в произвольном порядке.

При задании исходной информации допускается ряд приемов, существенно сокращающих ее объем: признаки повторений при наличии регулярностей, принцип умолчания, позволяющий для ряда распространенных случаев подразумевать наличие той или иной информации, не задавая ее, и т. п.

## Сокращение объёма исходной информации при наличии регулярностей

### *Приемы сокращенной записи списков*

Входной язык допускает использование списков.

Сокращение объема информации в списках производится следующим образом:

- если номера элементов (или узлов) в строке документа следуют подряд, то применима запись вида **1–N** (т. е. с 1-го по N-й), что не исключает простого перечисления;
- номера элементов списка 1, 5, 9, 13, 17 могут быть описаны с помощью оператора повторения **R** следующим образом: 1 R 17 4; эта запись означает список, который включает каждый четвертый элемент (4) из набора элементов с номерами от первого (1) по семнадцатый (17).

Оператор повторения работает в строках документа 0 следующим образом: стоящее перед **R** число есть первое число списка; число после **R** — последнее число списка (если оно член прогрессии); третье число — шаг арифметической прогрессии.

В описании списка объектов можно комбинировать оба способа описания, например, 1–25 26 R 41 3 42 43. В приведенном примере в список попадут все элементы с номерами от 1 до 25 (1–25), а также 26, 29, 32, 35, 38, 41 (26 R 41 3), 42, 43.

### *Оператор повторений строк документов*

Используется оператор повторений, размещаемый в одной строке:

**R** N1 N2 N3 : K1 K2 K3 K4.../

Строка начинается с символа **R**, за которым следует от 1 до 3-х целых чисел:

- N1 - число повторяемых строк;
- N2 - количество повторений (число N2 может отсутствовать, в этом случае число повторений равно 1);

- N3 - номер строки, от которой отсчитывается число повторяемых строк. Число N3 может отсутствовать. В этом случае повторяются строки, непосредственно предшествующие оператору повторения.

После двоеточия указываются шаги повторений для каждой составляющей обычной строки документа. Их не может быть больше количества чисел (позиций) в строке документа, в котором используется оператор повторения. То есть:

- K1 - шаг, с которым меняются числа 1-ой позиции строки;
- K2 - шаг, с которым меняются числа 2-ой позиции строки и т. д.

Их значения для каждой позиции могут быть различными как по величине, так и по знаку.

Если значений Ki задано меньше, чем позиций в строке, то строка повторителей дополняется нулями, например:

| | | |
|---|---|---|
| 5 10 20 40/ | | 5 10 20 40/ |
| R 1 4:0 0 1 1/ | соответствует записи: | 5 10 21 41/ |
| | | 5 10 22 42/ |
| | | 5 10 23 43/ |
| | | 5 10 24 44/ |

Операторы повторений могут следовать один за другим. При этом порядковый номер строки и число строк, отсчитываемых операторами повторений, определяются для документа в развернутом виде (с учетом предыдущих повторений).

В позициях, содержащих целочисленную информацию, любая величина шага повтора при сложении с нулем повторяемой строки дает ноль. Характер целочисленной информации делает это правило удобным.

В документах (например, 4) с действительными числами сложение нулей с шагом повторения будет выполняться.

Примеры использования операторов повторений приведены при описании соответствующих документов.

## 33.3. Общая информация о задаче. Документ 0 «Заглавный»

Заглавный документ состоит из отдельных строк, каждая из которых имеет свой номер и содержит параметры управления расчетом.

Ненумерованная первая строка указывает на версию языка:

(0;Version=21/

**Таблица 33.3-1**

| № строки | Характер информации | Значение по умолчанию | Примечание |
|---|---|---|---|
| 1 | Шифр задачи, информация о задаче | | Наличие не обязательно |
| 2 | Признак схемы | Признак схемы 5 | |
| 3 | Системы координат | Декартова система координат | |
| 4 | Организация вычисления усилий в промежуточных сечениях стержней и усилий в узлах других КЭ | Вычисляются усилия в начале, середине и конце стержня, для других КЭ — в центре тяжести | |
| 8 | Управление вычислением расчетных сочетаний усилий | РСУ вычисляются для всех элементов схемы | При наличии документа 8 |
| 12 | Унификация сечений элементов | Унификация отсутствует | Только при наличии документа 8 |
| 15 | Задание групп РСУ | Одна группа РСУ для всех элементов | Только при наличии документа 8 |
| 16 | Учет крановых и тормозных загружений в РСУ | В РСУ включаются не более 2-х крановых и одного тормозного загружения | Только при наличии документа 8 |
| 17 | Группы элементов | | |

| № строки | Характер информации | Значение по умолчанию | Примечание |
|---|---|---|---|
| 18 | Группы узлов | | |
| 19 | Характеристики стали | Используются при проверке и подборе металлопроката. По умолчанию отсутствуют | |
| 21 | Данные для устойчивости | | |
| 22 | Данные для вычисления главных и эквивалентных напряжений | | |
| 23 | Параметры расчета | | |
| 31 | Имена групп элементов | | |
| 32 | Имена групп узлов | | |
| 33 | Единицы измерения | Т, см, м, градусы Цельсия, сек. | |

В некоторых строках может быть указан только их номер. Строки заполняются по мере необходимости, т. е. документ может состоять лишь из одной строки, например:

**(0; Version=21/1; Рама/)**

Большинство строк документа имеет списковую структуру. Особенности оформления списков приведены в описании этих строк. Общие же правила заполнения строк следующие:

- строка начинается со своего номера, за которым следует символ «**;**» — точка с запятой;
- за номером строки следует произвольное число списков, разделенных друг от друга «**;**» — точкой с запятой;
- список может иметь заголовок, отделенный от остальной части списка символом «**:**» — двоеточие;
- строка заканчивается символом «/»;
- каждая строка может быть оформлена в виде отдельного нулевого документа.

## Шифр задачи (строка 1)

Шифр задачи представляет собой текстовое выражение. Для идентификации задачи используются первые 128 символов данного выражения. Если шифр задачи состоит из нескольких слов или содержит служебные символы, то он заключается в кавычки. В этом случае пробел допустим, например,

**1;"Это наименование задачи"/**

В строке возможно задание комментариев. При их наличии шифр задачи и комментарии разделяются символом «**;**».

## Признак схемы (строка 2)

Признак схемы задается в виде числа и определяет состав и число степеней свободы в узлах расчетной схемы, а также характеризует особенности ее напряженно-деформированного состояния. В соответствии с этим признаком производится удаление из системы уравнений заведомо нулевых неизвестных.

Для указания признака схемы (см. таблицу 33.3-2) используются следующие числа: 1–5, 8, 9 и 11, 12. Назначаемый признак схемы должен включать все необходимые степени свободы для используемых в расчетной схеме конечных элементов.

**Основные характеристики схем, в зависимости от значения их признака. Таблица 33.3-2**

| Признак схемы | Положение в пространстве | Перемещения в узле по направлениям общей системы координат | Типы степеней свободы в документах | Характеристики конструкций |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Плоскость XOZ | Линейные по X, Z | 1, 3 | Плоская шарнирно-стержневая система. Балка-стенка (плосконапряженная задача) и плоско-деформированная задача теории упругости |
| 2 | Плоскость XOZ | Линейные по X, Z; поворот $U_Y$ вокруг оси Y | 1, 3, 5 | Плоская рама |
| 3 | Плоскость XOY | Линейное по Z; повороты $U_X$, $U_Y$ вокруг осей X и Y | 3, 4, 5 | Балочный ростверк, плита, плита на упругом основании |
| 4 | Любое | Линейные по X, Y, Z | 1, 2, 3 | Пространственная шарнирно-стержневая система, массивное тело (объемная задача теории упругости) |
| 5 | Любое | Линейные по X, Y, Z; повороты $U_X$, $U_Y$ и $U_Z$ вокруг осей X, Y и Z | 1–6 | Признак схемы общего вида. Позволяет рассчитывать пространственные конструкции зданий, оболочки. Любая конструкция с признаками схемы 1–4 может быть посчитана с признаком 5 |
| 8 | Любое | К шести степеням свободы признака 5 добавлены шесть их аналогов: AX, AY, AZ и BX, BY, BZ | 1–12 | Конструкции из многослойных пологих оболочек и пластин. Дополнительные степени свободы учитывают влияние деформаций поперечного сдвига и обжатия при пространственной работе конструкции |
| 9 | Любое | К шести степеням свободы признака 5 добавлены шесть их аналогов: AX, AY, AZ и CX, CY, CZ | 1–9, 12–15 | Конструкции из многослойных пологих оболочек и пластин. Дополнительные степени свободы учитывают влияние межслоевых сдвигов и кривизны |
| 11 | ROZ | Линейные AX и Z по осям R и Z соответственно | 10, 3 | Осесимметричная задача теории упругости, когда тело и приложенная к нему нагрузка обладают симметрией вращения |
| 12 | ROZ | Линейные AX и Z по осям R и Z соответственно, угол поворота CY | 10, 3, 14 | Осесимметричная задача теории упругости, когда тело и приложенная к нему нагрузка обладают симметрией вращения |

## Системы координат (строка 3)

Строка 3 вводится в тех случаях, когда необходимо преобразовать координаты узлов, заданные в документе 4. Можно использовать цилиндрическую, сферическую и др. системы координат.

Информация в строке задается в виде списков, имеющих следующую структуру:

**<тип преобразования> [список узлов][: численные характеристики преобразования]*;**

Указанные в строке 3 преобразования координат можно использовать и при задании нагрузок в этих же системах координат. Если список узлов не задан, то преобразование выполняется для всех узлов.

Допустимые типы преобразований и необходимые для них численные характеристики, а также задание нагрузок в этих системах координат подробно описано в разд. 33.13.

Преобразования выполняются последовательно для каждого списка. Необходимо помнить, что информация данной строки не сохраняется в проекте.

* Здесь и далее в квадратные скобки заключаются необязательные элементы языка.

### Вычисление усилий в промежуточных сечениях и узлах (строка 4)

В этой строке для стержневых конечных элементов указывается количество сечений, в которых должны быть вычислены усилия. Для прочих конечных элементов отмечается необходимость вычисления узловых усилий и (или) вычисление напряжений в узлах элементов.

Строка состоит из списков типа:

**к: <список элементов>;**

Для стержней **к** — число сечений. Если **к** ≤ 2, то усилия будут вычисляться только в начале и в конце стержня.

Для остальных конечных элементов **к** может иметь одно из следующих значений:

- **к** = 0 — вычисляются усилия в центре конечного элемента (по умолчанию);
- **к** < 100 — вычисляются усилия в центре конечного элемента и усилия, передаваемые элементом на узел (реакции);
- **к** = 100 — вычисляются напряжения (усилия) в точках примыкания КЭ к узлам и в его центре;
- **к** = 101 — вычисляются усилия в точках примыкания КЭ к узлам, в его центре и усилия, передаваемые элементом на узел (реакции).

Если элемент попал в несколько списков, то для него действительна информация последнего списка, в котором он задан.

Отсутствие строки 4 означает, что для стержней будут вычислены усилия в начале, в середине и в конце, а для других КЭ будут вычислены усилия только в центре.

### Управление вычислением расчетных сочетаний усилий (строка 8)

Эта строка заполняется при наличии документа 8 (см. разд. 33.11). В ней указывается список элементов, для которых необходимо вычислить расчетные сочетания усилий.

### Унификация сечений элементов (строка 12)

В этой строке задаются номера унифицированных групп (см. главу 18), а также указывается, по каким сечениям и каким образом (тип унификации) следует унифицировать элементы группы.

Строка состоит из списков, в заголовках которых указывается тип и группа унификации, а в перечислении — номера элементов, входящих в указанную группу. Количество групп в каждом типе — от одного до девяти.

Тип и группа унификации задаются двузначным числом, где первая цифра означает тип унификации, а вторая — группу, например, запись

**12; 21 75-86/**

означает: строка 12, тип унификации 1, унифицированная группа 2, элементы, входящие в эту группу, имеют номера от 75 по 86 включительно. Для пластинчатых КЭ можно использовать любой из типов унификации, т. е. реализовать возможные 3×9 = 27 унифицированных групп.

Отсутствие этой строки означает отсутствие унификации.

### Организация групп расчетных сочетаний усилий (строка 15)

Эта строка заполняется при наличии документа 8 и в том случае, когда коэффициенты РСУ, задаваемые в документе 8, для разных групп элементов схемы неодинаковы (см. главу 18).

В документе 8, начиная с 10-го столбца, указываются величины коэффициентов, с которыми данное загружение будет участвовать в выборе РСУ. В строке 15 в заголовке указываются номера столбцов коэффициентов, с которыми входит в РСУ группа элементов. Номера этих элементов перечисляются после заголовка. При этом столбец 10 соответствует 1-му сочетанию и при заполнении строки 15 получает номер 1, столбец 11 — получает номер 2, столбец 12 — 3 и т. д.

Количество чисел в заголовке указывает количество исследуемых столбцов коэффициентов в сочетаниях. При этом первые три номера столбцов:

- первое основное сочетание;
- второе основное сочетание;
- особое сочетание.

Один и тот же элемент может входить не более, чем в две группы сочетаний.

Запись вида: **15; 1 2 3: 181-184; 4 5 6: 508-511;/** означает, что для элементов 181–184 определяются РСУ, коэффициенты которых находятся в 10 (1), 11(2), 12(3) столбцах, а для элементов 508–511 — в 13(4), 14(5) и 15(6) столбцах.

Если номер элемента не указан ни в одной группе сочетаний (или строка отсутствует), то РСУ для этого элемента будут выполняться для всех заполненных столбцов коэффициентов документа 8.

### Допускаемое количество крановых и тормозных загружений, входящих в расчетные сочетания усилий (строка 16)

Эта строка заполняется только при наличии крановых загружений. В строке указываются два числа: количество одновременно учитываемых крановых загружений и количество одновременно учитываемых тормозных загружений.

По умолчанию производится одновременный учет двух крановых и одного тормозного загружений.

### Данные для устойчивости (строка 21)

Задается строка следующего вида:

**<параметры> [:<список загружений,(комбинаций)>]**

где параметры:

- вид расчета ( 0 – загружения, 1 – комбинации );
- признак вычисления коэффициентов;
- признак вычисления форм;
- признак вычисления свободных длин;
- верхняя граница поиска;
- нижняя граница поиска.

Список загружений, (комбинаций) отделен от параметров символом “**:**” и может отсутствовать. В этом случае вычисления выполняются для всех статических загружений.

### Данные для вычисления главных и эквивалентных напряжений (строка 22)

Задаются следующие параметры:

- признак вычисления главных напряжений по загружениям;
- признак вычисления главных напряжений по комбинациям загружений;
- признак вычисления эквивалентных напряжений по загружениям;
- признак вычисления эквивалентных напряжений по комбинациям загружений;
- номер теории прочности;
- константы для теорий прочности (до 4-х).

### Параметры расчета (строка 23)

В этой строке задаются значения параметров, многие из которых описаны в главе 11. Приведем пример заполнения такой строки:

**23;LoadingCode=1;**
**SteelCode=1;**
**ConcreteCode=1;**
**SafetyCode=1;**
**TypeSolver=0;**
**NoForceInsert=1;**
**PrecessionGauss=12;**
**MaxQuantityPointTime=2;**
**MaxIterStabForm=20;**
**QuantityStepAddLoad=10;**
**CoeffIntervalGeom=5;**

Параметры **LoadingCode**, **SteelCode**, **ConcreteCode**, **SafetyCode** определяют нормы проектирования, используемые при комбинировании нагрузок и воздействий, расчете элементов стальных конструкций, расчете элементов железобетонных конструкций и нормы надежности, соответственно. В таблице ниже приведена используемая нумерация.

| LoadingCode | SteelCode | ConcreteCode | SafetyCode |
|---|---|---|---|
| 1 - СНиП 2.01.07-85 (с изменениями № 2)<br>2 - СНиП 2.01.07-85<br>3 - ДБН В.1.2-2-2006<br>6 - СП 20.13330.2011<br>9 - СП 20.13330.2016 | 1 - СНиП II-23-81<br>2 - СП 53-102-2004<br>3 - Eurocode 3<br>5 - СП 16.13330.2011<br>6 - ДБН В.2.6-163:2010<br>7 - ДБН В.2.6-198:2014 | 1 - СНиП 2.03.01-84<br>2 - СНиП 2.03.01-84 (с изменениями для Украины)<br>5 - СНиП 52-01-2003<br>7 - СП 63.13330.2012<br>8 - СП 63.13330.2018 | 1 - ГОСТ 27751<br>2 - ГОСТ Р 54257-2010<br>3 - ДБН В.1.2-14-2009<br>4 - Eurocode 0<br>5 - ГОСТ 27751-2014 |

### Списки удаленных узлов и элементов (строки 31 и 32)

Содержит списки удаленных узлов (31) и элементов (32), которые можно вернуть в расчетную схему соответствующими операциями восстановления (см. главу 6).

### Единицы измерения (строка 33)

Эта строка предназначена для задания размерностей величин в исходных данных. Базовыми единицами линейных величин являются **метры**, силовых — **тонны**, температурных — **градусы Цельсия**. Для описания размеров сечений стержней введен специальный переводной коэффициент.

В строке через пробел указываются обозначения единиц и переводные коэффициенты по отношению к базовым единицам. Порядок задания переводных коэффициентов приведен ниже. Строка имеет вид:

**33: L** $\alpha_1$ **s** $\alpha_2$ **F** $\alpha_3$ **t** $\alpha_4$ **/**

Здесь **L**, **s**, **F**, **t** — обозначения единиц измерения, соответственно: линейных размеров, размеров сечения стержня, сил, температуры; $\alpha_1$, $\alpha_2$, $\alpha_3$, $\alpha_4$ — переводные коэффициенты.

## 33.4. Документы, описывающие расчетную схему

### Документ 1. «Элементы»

Каждая строка документа содержит описание или конечного элемента или оператора повторения.

Описание элемента имеет следующий вид:

**< тип > < номер жесткости> <список узлов элемента> [Name=<имя>]/**

где

- тип элемента задается согласно табл. 3.2-1.
- номер жесткости из документа 3;
- список узлов элемента в соответствии с его описанием;
- имя элемента в случае его задания сохраняется при любых преобразованиях расчетной схемы. Оно берется в кавычки в случае наличия специальных символов.

Оператор повторения имеет вид, описанный в разд. 33.2.

***Пример:***

```
(1/ 2 15 3 10/  r 1 5: 0 0 1 1/  51 21 12/  31 2 34 35 40 41 22 23 28 29/   21 1 11 14 18 19/ 12 1 12 15 27/ )
```

В примере содержится информация о первых 10-ти элементах:

1-й – имеет тип 2, номер жесткости 15 документа 3; элемент 2-х узловой, номера узлов в элементе: 3 – номер первого узла, 10 – номер второго узла;

2–6-й – элементы также имеют тип 2 и номер жесткости 15, а номера узлов соответственно для 2-го 4, 11 и 8, 15 для 6-го. Они получены с помощью оператора повторения.

7-й – тип 51, номер жесткости 21; элемент одноузловой, узел 12;

8-й – тип 31, тип жесткости 2, элемент 8-ми узловой, номера узлов: 34, 35, 40, 41, 22, 23, 28, 29;

9-й – тип 21, тип жесткости 1, элемент 4-х узловой; номера узлов: 11, 14, 18, 19;
10-й – тип 12, тип жесткости 1, элемент 3-х узловой; номера узлов: 12, 15, 27.

Следует помнить, что:

- каждому КЭ в расчетной схеме присваивается его порядковый номер в документе 1, который затем используется для идентификации результатов расчета (усилий, напряжений, РСУ и т. д.) и используется во всех постпроцессорах комплекса для работы с элементом;
- последовательность описания узлов обязана соответствовать порядку их следования, описанному в главе 3 (см. таблицу 3.2-1);
- последовательность описания узлов задает направление местных осей координат элемента $X_1$, $Y_1$, $Z_1$ для многих типов КЭ.

### Документ 2. «Условия примыкания»

Этот документ предназначен для описания условий примыкания к узлам расчетной схемы: освобождения угловых связей (шарнирное присоединение) или освобождения линейных связей (ползунковое присоединение).

Строка документа имеет следующий вид:

**<список освобождаемых связей> Node = <номер узла> [Name=<имя>]: <список элементов>**

Недопустима такая комбинация освобожденных связей, при которой элемент может перемещаться относительно конструкции как жесткое тело.

***Пример:***

```
(2/ 1  Node=1 : 1-10/ 6  Node=2 : 1-10/
```

Это означает, что элементы 1-10 имеют ползунковое присоединение по направлению X в первом узле и шарнирное присоединение по Z.

### Документ 4. «Координаты»

В документе задаются координаты узлов расчетной схемы. Тип системы координат определяется в строке 3 документа 0 (декартовы, цилиндрические, сферические, тороидальные). По умолчанию принимается декартова система координат. Каждая строка документа 4 описывает три пространственные координаты узла. При заполнении строки 3 документа 0 координаты задаются в соответствии с типом используемых преобразований в выбранной системе координат.

Так как строки документа не нумеруются, координаты задаются в порядке возрастания номеров узлов. Если в строке заданы одно или два числа, то последние недостающие координаты считаются равными 0. Для признаков системы 1 и 2 (строка 2 документа 0), описывающих плоскость XOZ, можно задавать только две координаты. Возможно задание имени узла с использованием идентификатора **Name**.

Оператор повторения имеет вид, описанный в разд. 33.2.

***Пример:***

```
(4/1.5 2.8  Name="Узел на
отм.1-1"/
  2.3 3.7 8.8/ 5/r 1 5: 0  0 2/
```

Здесь описаны координаты первых 8-и узлов:
узел 1 с координатами X=1.5м и Y=2.8м (Z=0) и заданным именем;
узел 2 с координатами X=2.3м и Y=3.7м, Z=8.8м;
узел 3 с координатами X=5м (Y=Z=0);
узлы 4-8 получены из 3-его последовательным подъемом на 2 м по Z.

### Документ 5. «Связи»[1]

Документ предназначен для задания краевых условий (условий опирания). Строка документа имеет следующий вид:

**<список связей > [Type = <тип>] [Name=<имя>]: <список узлов> /**

[1] Документы с номерами 1005, 2005, … описывают связи на этапах монтажа (см. гл. 14).

**<список связей>** представляет собой список номеров степеней свободы узла, на который накладываются связи.

Тип задает, каким образом накладываются связи:

- 0 – закрепление соответствующих степеней свободы;
- 1 – объединение степеней свободы по указанным направлениям для всех узлов списка.

Связи задаются в общей системе координат и обозначаются следующим образом:

1, 2, 3 — линейное перемещение вдоль осей X, Y и Z соответственно;

4, 5, 6 — углы поворота вокруг осей X, Y, Z соответственно;

7, 8, ..., 15 — вспомогательные степени свободы для многослойных и др. элементов.

***Пример:***

```
(5/ 1-3 : 1-10/  3 Type=1 : 11-15/)
```

Здесь в узлах 1-10 наложены связи по направлениям 1, 2, 3; в узлах 11-15 объединены перемещения по направлению Z.

Наличие этого документа не обязательно, например, он может отсутствовать при расчете плит на упругом основании.

## 33.5. Свойства элементов

### Документ 3. «Жесткостные характеристики»

Документ предназначен для описания физико-механических и некоторых геометрических характеристик конечных элементов. Поскольку жесткостные характеристики непосредственно связаны с типом конечного элемента, то подробное описание вводимых величин приводится в соответствующих разделах главы 3. Здесь даны правила подготовки документа.

В первой позиции каждой строки документа указывается номер типа жесткости. Этот номер используется в графе 2 документа 1 при описании КЭ. Затем для каждого типа КЭ задается определенный набор характеристик. В документе могут использоваться служебные слова для обозначения вводимых характеристик.

В следующих позициях приводятся параметры, характерные для элементов данного типа. В документе могут использоваться как позиционные параметры (они всегда занимают определенную позицию в строке), так и ключевые, для идентификации которых используются служебные слова.

При задании характеристик в документе 3 используется система единиц, описанная в строке 33 документа 0.

В простейших случаях характеристики жесткости КЭ можно задать в виде следующих наборов позиционных параметров:

E, ν, δ — для пластинчатых элементов;

E, ν, δ, $C_1$, $C_2$ — для плит на упругом основании[1];

E, ν — для объемных КЭ,

где E — модуль упругости; ν — коэффициент Пуассона; δ — толщина пластины; $C_1$, $C_2$ — коэффициенты постели.

Для КЭ стержней численное описание жесткостей может быть выполнено с использованием позиционных параметров по правилам, приведенным в таблице 33.5-1.

**Таблица 33.5-1**

| Типы КЭ | Жесткостные характеристики | Условные обозначения |
|---|---|---|
| 1, 4 | EF | EF — продольная жесткость; |
| 2 | EF $EI_Y$ [$GF_Y$] | $EI_Y$, $EI_Z$ — изгибные жесткости относительно осей $Y_1$ и $Z_1$; |
| 3, 4 | $EI_Y$ $GI_{kr}$ | $GI_{kr}$ — крутильная жесткость; |
| 5, 6 | EF $EI_Y$ $EI_Z$ $GI_{kr}$ [$GF_Y$ $GF_Z$] | $GF_Y$, $GF_Z$ — сдвиговые жесткости. |

Кроме того, жесткостные характеристики могут быть заданы в виде комбинации ключевых слов (идентификаторов) и соответствующих им параметров. Идентификаторы, если это специально

[1] Задание жестких вставок, коэффициентов постели, местных систем координат в 3-м документе устарело, но допустимо. Правильнее использовать документы 31-34.

не оговорено, могут следовать в произвольном порядке. Для типов жесткости стержневых элементов порядок идентификаторов произволен. Для остальных – первым идет идентификатор из первой строки соответствующей таблицы.

Все возможные варианты задания жесткостных характеристик приведены: для стержневых элементов — в таблице 33.5-2, для пластин — в табл. 33.5-3, объемных элементов — в таблице 33.5-4, многослойных пластин — в таблице 33.5-5.

**Таблица 33.5-2**

**Характеристики стержневых элементов**

| Содержание | Идентификатор | Параметры | Примечания |
|---|---|---|---|
| Числовые характеристики | нет | EF $EI_Y$ $EI_Z$ $GI_{kr}$ [$GF_Y$ $GF_Z$] | Задаются при численном и численно-параметрическом задании жесткостных характеристик. Количество чисел зависит от типа конечного элемента согласно таблице 33.5-1. Следуют сразу за номером типа жесткости |
| Параметрические сечения | **S0** | E, b, h | E — модуль упругости. Описание и размеры сечений приведены в таблице 3.3-3 |
| | **S1** | E, b, h, $b_1$, $h_1$ | |
| | **S2** | E, b, h, $b_1$, $h_1$ | |
| | **S3** | E, b, h, $b_1$, $h_1$, $b_2$, $h_2$ | |
| | **S4** | E, b, h, $b_1$, $h_1$ | |
| | **S5** | E, b, h, $b_1$, $h_1$ | |
| | **S6** | E, D, d | |
| | **S7** | E, b, h, $b_1$, $h_1$, $h_2$, $h_3$ | |
| | **S8** | E, $b_1$, $h_1$, $Y_1$, $Z_1$, $b_2$, $h_2$, $Y_2$, $Z_2$, … | |
| Переменные сечения | **VS** | <геометрические характеристики концевого сечения> | В S00–S08 задаются геометрические характеристики в начале сечения, в VS – в конце |
| Сварные сечения | **S41** | E, b, $t_f$, h, $t_w$ | E — модуль упругости. Описание и размеры сечений приведены в таблице 3.3-3 |
| | **S42** | E, b, t, h, $t_w$, $b_2$, $t_2$ | |
| | **S43** | E, $b_{f1}$, $t_{f1}$, $h_w$, $t_w$ | |
| | **S44** | E, $b_f$, $t_f$, $h_w$, $t_w$ | |
| | **S45** | E, $b_f$, $t_f$, $h_w$, $t_w$ | |
| | **S46** | E, b, h, $t_1$, $t_2$ | |
| Холодногнутые сечения | **S51** | E, h, b, s, r | Описание и размеры сечений приведены в таблице 3.3-3. Модуль упругости и вычисленные жесткостные характеристики задаются с помощью параметра S198 |
| | **S52** | E, h, b, s, r | |
| | **S53** | E, h, b, s, $h_1$, r | |
| | **S54** | E, h, b, s, c, r, $\alpha$ | |
| | **S55** | E, h, b, s, $h_1$, r, $b_2$ | |
| | **S56** | E, h, b, s, r | |
| | **S57** | E, h, b, s, $h_1$, r | |
| | **S58** | E, h, b, s, $h_1$, r, $\alpha$ | |
| | **S59** | E, h, b, s, a, r | |
| | **S60** | E, h, b, s, $h_1$, r, a | |
| | **S61** | E, h, b, s, a, r | |
| | **S62** | E, h, b, s, $h_1$, r, a | |
| | **S63** | E, h, b, s, $b_1$, r, $h_2$, $h_3$, $h_4$ | |
| | **S64** | E, h, b, s, $h_1$, $h_2$, $h_3$, $h_4$, $b_1$, r | |
| | **S65** | E, h, b, s, $h_1$, $h_2$, $h_3$, $h_4$, $b_1$, $b_2$, r | |
| Холодногнутые составные сечения | **S66** | E, h, b, s | Описание и размеры сечений приведены в таблице 3.3-3. Модуль упругости и вычисленные жесткостные характеристики задаются с помощью параметра |
| | **S67** | E, h, b, s, $h_1$, r | |
| | **S68** | E, h, b, s, $h_1$, r, $b_2$ | |
| | **S69** | E, h, b, s, $b_1$, r, $h_2$, $h_3$, $h_4$ | |

| Содержание | Идентификатор | Параметры | Примечания |
|---|---|---|---|
| | **S70** | E, h, b, s, $h_1$, $h_2$, $h_3$, $h_4$, $b_1$, r | S198 |
| | **S71** | E, h, b, s, $h_1$, $h_2$, $h_3$, $h_4$, $b_1$, $b_2$, r | |
| | **S72** | E, h, b, s, $h_1$, r | |
| | **S73** | E, h, b, s, r | |
| | **ST** | <имя раздела><br><номер строки> | Сечение из *Полного каталога профилей ГОСТ* (см. Приложение) |
| | **STZ** | <имя каталога><br><имя раздела><br><номер строки> | В **Приложении** приведен каталог профилей металлопроката, включенных в ВК **SCAD**.<br>Следующие записи эквивалентны:<br>**STZ RUSSIAN <имя раздела> <номер строки>**<br>**ST <имя раздела> <номер строки>** |
| | **STK** | <имя каталога><br><имя раздела><br><номер строки><br><код компоновки><br><дополнительные параметры> | Виды составных сечений приведены на рис. 3.3-2. Код компоновки и дополнительные параметры задаются в соответствии с таблицей 3.3-4 |
| | **S199** | E ν EF $EI_Y$ $EI_Z$ $GI_{KR}$ $GF_Y$ $GF_Z$ $Y_1$ $Y_2$ $Z_1$ $Z_2$ Alfa | E — модуль упругости;<br>ν — коэффициент Пуассона;<br>EF, $EI_Y$, $EI_Z$, $GI_{KR}$, $GF_Y$, $GF_Z$ — жесткостные характеристики (см. таблицу 33.5-1);<br>$Y_1$, $Y_2$, $Z_1$, $Z_2$ — размеры ядра сечения;<br>Alfa — поворот главных осей инерции по отношению к конструктивным осям |
| | **FILE** | <имя файла> | В указанном файле должны находиться данные конструктора |
| Для холодногнутых сечений S51-S73 | **S198** | E ν EF $EI_Y$ $EI_Z$ $GI_{KR}$ $GF_Y$ $GF_Z$ $Y_1$ $Y_2$ $Z_1$ $Z_2$ Alfa | E — модуль упругости;<br>ν — коэффициент Пуассона;<br>EF, $EI_Y$, $EI_Z$, $GI_{KR}$, $GF_Y$, $GF_Z$ — жесткостные характеристики (см. таблицу 33.5-1);<br>$Y_1$, $Y_2$, $Z_1$, $Z_2$ — размеры ядра сечения;<br>Alfa — поворот главных осей инерции по отношению к конструктивным осям |
| | **E** | E | |
| | **NU** | ν | По умолчанию принято значение 0.2 для параметрических сечений и 0.3 для сечений из металлопроката |
| | **KE** | <тип элемента> | Для задания типа элемента. От его значения зависит набор параметров при численном и численно-параметрическом описании жесткостей (см. таблицу 33.5-1) |
| | **Y** | $l_{Y,1}$ $l_{Y,2}$ | См. рис. 3.3-10. Используются для выбора РСУ при численном задании жесткостей |
| | **Z** | $l_{Z,1}$ $l_{Z,2}$ | |
| | **GF** | нет | Учет сдвига в элементах. При численном описании необходимо задать $GF_Y$ и $GF_Z$ |
| Преднапряжение | **N** | N | При нелинейном расчете, например, преднапряжение ванты |
| Удельный вес | **RO** | ρ | Удельный вес |
| Имя | **NAME** | <имя типа жесткости> | Имя типа жесткости. Оно не может быть более восьми символов. Если в нем заданы специальные символы, то имя берется в кавычки |
| Вычисленные дополнительные характеристики | **SHIFT** | $GI_{kr}$ $GF_Y$ $GF_Z$ | Вычисляются программой дополнительно при отсутствии в сортаменте металло-проката |

| Содержание | Идентификатор | Параметры | Примечания |
|---|---|---|---|
| Для вантовых элементов | **VANTA** | | Признак вантового элемента |

**Таблица 33.5-3**

**Характеристики пластин**

| Содержание | Идентификатор | Параметры | Примечания |
|---|---|---|---|
| Свойства материала | **GE, GEI** | $E\ \mu\ \delta$ | Соответственно, для изотропного, ортотропного и анизотропного материалов (см. разд. 3.4).<br>*Для пластин после номера типа жесткости* ***обязательно следует*** описание материала |
| | **GEO** | $E_1\ E_2\ \nu_{12}\ \nu_{21}\ G_{12}\ \delta$ | |
| | **GEA** | $E_1\ E_2\ \nu_{12}\ \nu_{21}\ G_{12}\ \eta_{12,1}\ \eta_{12,2}\ \eta_{1,12}\ \eta_{2,12}\ \delta$ | |
| Дополнительные свойства материала для плоско-деформируемых систем | **PD, PDI** | нет | Расчет плоско-деформированных систем (вместо плосконапряженных), соответственно, для изотропного (**PD** и **PDI**), трансверсально-изотропного (**PDT**), ортотропного и анизотропного материалов (**PDA**) |
| | **PDT** | $E_3\ \nu_{13}\ \nu_{31}$ | |
| | **PDO** | $E_3\ \nu_{13}\ \nu_{31}\ \nu_{23}\ \nu_{32}$ | |
| | **PDA** | $E_3\ \nu_{13}\ \nu_{31}\ \nu_{23}\ \nu_{32}\ \eta_{12,3}\ \eta_{3,12}$ | |
| | **XNT** | $X_T\ Y_T\ Z_T$ | |
| Имя | **NAME** | <имя типа жесткости> | Имя типа жесткости. Оно не может быть более восьми символов. Если в нем заданы специальные символы, то имя берется в кавычки |
| Коэффициенты редуцирования | **CRPL**<br>**CRBL** | $C_{pl}$<br>$C_{bl}$ | Коэффициент редуцирования изгибных жесткостей<br>Коэффициент редуцирования мембранных жесткостей |

**Таблица 33.5-4**

**Характеристики объемных элементов**

| Содержание | Идентификатор | Параметры | Примечания |
|---|---|---|---|
| Свойства материала | **OB** | $E\ \nu$ | Задание числовых характеристик изотропного (**OB**), трансверсально-изоторопного (**OBT**) и ортотропного (**OBO**) материалов (см. разд. 3.5).<br>Для объемных элементов после номера типа жесткости ***обязательно следует*** описание материала |
| | **OBT** | $E\ E_3\ \nu_{12}\ \nu_{13}\ G_{13}$ | |
| | **OBO** | $E_1\ E_2\ E_3\ \nu_{12}\ \nu_{21}\ \nu_{13}\ \nu_{31}\ \nu_{23}\ \nu_{32}\ G_{12}\ G_{13}\ G_{23}$ | |
| Имя | **NAME** | <имя типа жесткости> | Имя типа жесткости. Оно не может быть более восьми символов. Если в нем заданы специальные символы, то имя берется в кавычки |

**Таблица 33.5-5**

**Характеристики многослойных пластин**

| Содержание | Идентификатор | Параметры | Примечания |
|---|---|---|---|
| Признак характеристик многослойных пластин | **GEM** | нет | Следует сразу за номером типа жесткости в документе 3. Его задание является ***обязательным*** |
| Свойства материала | **L, LI** | $E^{(k)}\ \nu^{(k)}\ \delta^{(k)}$ | Соответственно, для изотропного, трансверсально-изотропного и ортотропного материалов (см. разд. 3.7).<br>Характеристики материалов слоев задаются сразу за идентификатором **GEM** последовательно, начиная с самого нижнего.<br>Наличие хотя бы одного идентификатора **L**, **LI**, **LT** или **LO** ***обязательно*** |
| | **LT** | $E^{(k)}\ \nu_{13}^{(k)}\ \nu_{31}^{(k)}\ G_{13}^{(k)}\ \delta^{(k)}$ | |
| | **LO** | $E_1^{(k)}\ E_2^{(k)}\ E_3^{(k)}\ \nu_{12}^{(k)}\ \nu_{21}^{(k)}\ \nu_{13}^{(k)}\ \nu_{31}^{(k)}\ \nu_{23}^{(k)}\ \nu_{32}^{(k)}\ G_{12}^{(k)}\ G_{13}^{(k)}\ G_{23}^{(k)}\ \delta^{(k)}$ | |

| Содержание | Идентификатор | Параметры | Примечания |
|---|---|---|---|
| Эксцентриситет | **DZ** | Δ | Задание эксцентриситета в случае, если поверхность приведения (координатная поверхность) не совпадает со срединной поверхностью элемента |
| Имя | **NAME** | <имя типа жесткости> | Имя типа жесткости. Оно не может быть более восьми символов. Если в нем заданы специальные символы, то имя берется в кавычки |

В таблице 33.5-7 приведены примеры описания жесткостных характеристик в документе 3.

**Таблица 33.5-6**

**Характеристики односторонних связей**

| Содержание | Идентификатор | Параметры | Примечания |
|---|---|---|---|
| Признак характеристик односторонних связей | **OSD** | EF | Следует сразу за номером типа жесткости в документе 3. Его задание является обязательным |
| Направление связи | **ORT** | ΔX, ΔY, ΔZ | Направление связи, если оно не определено двумя узлами элемента |
| Знак | **SGN** | ±1 | Связь отключается при сжатии/растяжении |
| Зазор | **DL** | DL | Величина зазора, после которой связь включается/отключается |
| Преднапряжение | **N** | N | |
| Преднапряжение смещением | **DZ** | DZ | |

**Таблица 33.5-7**

**Характеристики связей конечной жесткости, упругих связей, нуль-элементов и жестких тел**

| Содержание | Идентификатор | Параметры | Примечания |
|---|---|---|---|
| Признак характеристик | **SPRING** | EX, EY, EZ ... | Следует сразу за номером типа жесткости в документе 3. Его задание является обязательным.<br>За ним следуют величины жесткостей.<br>При отсутствии связей задается нулевое значение |
| Преднапряжение смещением | **TYPE** | 51, 55, 100 или 151 | Тип конечного элемента.<br>151 - для нуль-элементов |

**Таблица 33.5-8**

**Характеристики законтурных элементов плиты**

| Содержание | Идентификатор | Параметры | Примечания |
|---|---|---|---|
| Признак характеристик | **BED** | e1, e2 | Следует сразу за номером типа жесткости в документе 3. Его задание является обязательным.<br>За ним следуют величины жесткостей в соответствии с описанием элемента |
| Преднапряжение смещением | **TYPE** | 53 или 54 | Тип конечного элемента |

**Таблица 33.5-9**

**Примеры описания жесткостных характеристик**

| Текст документа 3 | Содержание |
|---|---|
| 1 **S0** 3.52e+06 30 40 **RO** 2.5 **NAME** “Колонна”/ | Прямоугольное сечение 30х40см, модуль упругости материала 3.52e+06Т/м$^2$, удельный вес 2.5Т/м$^3$ |
| 2 **STZ** RUS_OLD I2 10 **RO** 7.85/ | Сечение из «*Старых сортаментов (1926, 1932 г.г.)*». Двутавр |

| Текст документа 3 | Содержание |
|---|---|
| | балочный 24а по ОСТ 16-1932 (10-я строка сортамента), удельный вес — 7.85Т/м$^3$ |
| 3 **GE** 3.06e+06 0.15 0.1 **RO** 2.5/ | Жесткости изотропной пластины толщиной 0.1м, лежащей на упругом основании |

## Документ 31. «Жесткие вставки»

Строка документа имеет вид:

**$X_1$ $Y_1$ $Z_1$ $X_2$ $Y_2$ $Z_2$ [Type=3]: <список элементов> /,**

где

**$X_1$ $Y_1$ $Z_1$** – вектор, задающий жесткую вставку в начале элемента;
**$X_2$ $Y_2$ $Z_2$** – вектор, задающий жесткую вставку в конце элемента;
**GroupElem=1** – тип стержневого элемента;
**Type** – тип задания жестких вставок: 0 – рис. 3.3-12, 3 - рис. 3.3-13 при задании жесткой вставки в общей системе координат.

## Документ 32. «Положение главных осей инерции»

Строка документа имеет вид:

**<идентификатор> <данные >: <список элементов> /**

Позволяет задать направления главных осей инерции стержневых элементов для указания правильного положения сечения элемента. Для пластинчатых и объемных элементов позволяет задать направления главных осей инерции для учета ортотропии материала.

Допустимые идентификаторы и данные для них приведены ниже.

| Тип элемента | Идентификатор | Данные | Содержание |
|---|---|---|---|
| Стержни | **F** | $F_K$ | Значение угла в градусах или радианах (см. рис. 3.3-6) |
| | **FR** | $F_K$ | |
| | **FK** | $X_T$ $Y_T$ $Z_T$ | Координаты точки (см. рис. 3.3-7 и 3.3-8), которая лежит на оси $Y_1$ или $Z_1$ |
| | **ZK** | | |
| | **FD** | $X_D$ $Y_D$ $Z_D$ | Вектор, задающий направление осей $Y_1$ или $Z_1$ |
| | **ZD** | | |
| Пластины | **EX** | $X_D$ $Y_D$ $Z_D$ | Задание в общей системе координат вектором (**EX**) или координатами точки, лежащей на этой оси (**EXT**). Заданное направление проектируется на плоскость элемента для определения оси $X_0$ ортотропии. Ось $Z_0$ совпадает с осью $Z_1$, ось $Y_0$ ортогональна $X_0$ и $Z_0$, а тройка $X_0$, $Y_0$, $Z_1$ — правая |
| | **EXT** | $X_T$ $Y_T$ $Z_T$ | |
| | **EY** | $X_D$ $Y_D$ $Z_D$ | Задание в общей системе координат вектором (**EY**) или координатами точки, лежащей на этой оси (**EYT**). Заданное направление проектируется на плоскость элемента для определения оси $Y_0$ ортотропии. Ось $Z_0$ совпадает с осью $Z_1$, ось $Y_0$ ортогональна $X_0$ и $Z_0$, а тройка $X_0$, $Y_0$, $Z_1$ — правая |
| | **EYT** | $X_T$ $Y_T$ $Z_T$ | |
| Объемные элементы | **VXY** | $\Delta X_1$, $\Delta Y_1$, $\Delta Z_1$, $\Delta X_2$, $\Delta Y_2$, $\Delta Z_2$ | Задание векторами, определяющими направления осей $X_0$ и $Y_0$ |
| | **VXZ** | | Задание векторами, определяющими направления осей $X_0$ и $Z_0$ |
| | **VYZ** | | Задание векторами, определяющими направления осей $Y_0$ и $Z_0$ |

| Тип элемента | Идентификатор | Данные | Содержание |
|---|---|---|---|
| | **FR** | α, β, γ | Три угла Эйлера |
| | **VCPP** | $X_1$, $Y_1$, $Z_1$, $X_2$, $Y_2$, $Z_2$ | В цилиндрической системе двумя точками |
| | **VSPP** | $X_1$, $Y_1$, $Z_1$, $X_2$, $Y_2$, $Z_2$ | В сферической системе двумя точками |

### Документ 33. «Системы координат вычисления напряжений и усилий»

Документ имеет вид аналогичный документу 32.

### Документ 34. «Коэффициенты постели»

Строка документа имеет вид:

**<идентификатор> <данные > [<идентификатор> <данные >…]: <список элементов> /**

Задает параметры упругого основания для стержневых и пластинчатых элементов.

| Тип элемента | Идентификатор | Данные | Содержание |
|---|---|---|---|
| Стержни | **CZ** | b $C_{1Z}$ $C_{2Z}$ | b — ширина сечения стержня (м);<br>$C_{1Z}$ — коэффициент постели типа Винклеровского в направлении оси $Z_1$ (Т/м$^3$);<br>$C_{2Z}$ — Пастернаковский коэффициент постели в направлении оси $Z_1$ (Т/м) |
| | **CY** | h $C_{1Y}$ $C_{2Y}$ | h — высота сечения стержня (м);<br>$C_{1Y}$ — коэффициент постели типа Винклеровского в направлении оси $Y_1$(Т/м$^3$);<br>$C_{2Y}$ — Пастернаковский коэффициент постели в направлении оси $Y_1$(Т/м) |
| Пластины | **C1** | $C_1$ | Жесткость упругого основания на сжатие |
| | **C2** | $C_2$<br>$C_{2,x}$ $C_{2,y}$<br>$C_{2,x}$ $C_{2,y}$ $C_{2,xy}$ | Жесткости упругого основания на сдвиг (срез) для изотропного, ортотропного и анизотропного упругого основания. Их система координат совпадает с системой координат жесткостных характеристик |

## 33.6. Задание статических загружений

Для задания статических загружений используются документы 6 и 7. Статические нагрузки могут быть заданы в виде сосредоточенных и распределенных сил и моментов, температурных воздействий, а также величиной смещения связи (заданное перемещение). Для каждой нагрузки записывается следующая информация:

В документе 6:
- тип нагрузки (статическая, динамическая);
- данные для динамических загружений.

В документе 7:
- номер загружения, в котором приложена нагрузка;
- вид нагрузки;
- направление действия нагрузки вдоль осей местной или общей системы координат;
- место приложения нагрузки (списки номеров узлов или элементов);
- величины нагрузки (со своими знаками) и, если нужно, привязки, определяющие положение нагрузки в пределах одного конечного элемента, коэффициенты линейного расширения для температурной нагрузки и т. п.

### Документ 6. «Типы нагрузок»

Каждая строка документа имеет следующий вид:

**<номер загружения> [Type = <тип>] [Name=<имя>]**

**[<Числовые характеристики динамических загружений>]**
**[Aks=<имя файла>]**
**[AksX=<имя файла>] [AksY=<имя файла>] [AksZ=<имя файла>]**
**[Betta=<имя файла>]**
**[BettaX=<имя файла>] [BettaY=<имя файла>] [BettaZ=<имя файла>]**
**[: <маска масс для динамического загружения>]**

**Type** – зарезервировано для описания характеристик загружений. Для статических загружений – 0.

**[Aks=<имя файла>] –** имя файла акселерограммы для сейсмических загружений. Акселерограмма действует по всем трем направлениям. Для задания разных акселерограмм по направлениям используются нижеследующие идентификаторы.

**[AksX=<имя файла>]** – имя файла акселерограммы для сейсмических загружений. Акселерограмма действует по направлению X.

**[AksY=<имя файла>]** – имя файла акселерограммы для сейсмических загружений. Акселерограмма действует по направлению Y.

**[AksZ=<имя файла>]** – имя файла акселерограммы для сейсмических загружений. Акселерограмма действует по направлению Z.

**[Betta=<имя файла>] –** имя файла коэффициента динамичности для сейсмических загружений. Коэффициент динамичности действует по всем трем направлениям. Для задания разных коэффициентов динамичности по направлениям используются нижеследующие идентификаторы.

**[BettaX=<имя файла>] –** имя файла коэффициента динамичности для сейсмических загружений. Коэффициент динамичности действует по направлению X.

**[BettaY=<имя файла>] –** имя файла коэффициента динамичности для сейсмических загружений. Коэффициент динамичности действует по направлению Y.

**[BettaZ=<имя файла>] –** имя файла коэффициента динамичности для сейсмических загружений. Коэффициент динамичности действует по направлению Z.

**<маска масс для динамического загружения>** – позволяет учесть в данном загружении массы только по указанным направлениям. При отсутствии данного идентификатора будут учтены все заданные массы. Например, «:1 2» означает, будут в расчете учтены только массы по направлениям X и Y.

## Документ 7. «Величины нагрузок»

Документ предназначен для задания нагрузок на конструкцию. Каждая его строка имеет следующий вид:

**<вид нагрузки> <направление нагрузки> <список величин нагрузки> [Load=<номер>] [File=<имя>]**

**: <список узлов, элементов или загружений в зависимости от вида нагрузки> ,**

где

**[Load=<номер>] -** указывает, какому загружению соответствует описанная нагрузка. Если данный идентификатор отсутствует, то нагрузка относится к последнему заданному номеру.

**<вид нагрузки> -** задает описание нагрузки.

Основные виды нагрузок приведены в таблице 33.6-1.

**Таблица 33.6-1**

**Виды нагрузок**

| Характеристика | Вид | Содержание |
|---|---|---|
| Нагрузка на узел | 0 | Нагрузка по направлениям осей общей системы координат |
| | 1 | Заданное перемещение в узле (см. разд. 8.2) |
| | 2 | Нагрузка в специальной системе координат, заданной в строке 3 заглавного документа |
| | 3 | Нагрузка в специальной системе координат, заданной в документе 7 |

| Характеристика | Вид | Содержание |
|---|---|---|
| Массы при описании динамических загружений | 4 | 3-е число 3. Массы формируются автоматически путем преобразования статического загружения, номер которого указан в первой позиции строки (см. разд. 8.6) |
| | 100 | История нагружения на узел, заданная в виде графика |
| Нагрузка на конечные элементы по направлениям осей его местной системы координат | 5 | Сосредоточенная в точке |
| | 45 | Сосредоточенная в точке стержневого элемента с привязкой в долях длины гибкой части |
| | 6 | Равномерно распределенная |
| | 7 | Трапециевидная |
| | 47 | Трапециевидная на стержневых элементах с привязкой в долях длины гибкой части |
| | 8, 88 | Температурная |
| | 9 | Равномерно-распределенная по линии, соединяющей любые два узла элемента |
| | 10 | Трапециевидная нагрузка по линии, соединяющей любые два узла элемента |
| Расчет на заданные перемещения с помощью нуль-элементов | 11 | Нагрузка на «нуль-элементы», моделирующая заданное перемещение в местной системе координат элемента (см. разд. 8.2) |
| Нагрузка на конечные элементы по направлениям осей общей системы координат | 15, 16, 17, 19, 20 | Аналогично нагрузке в местной системе координат |
| | 55, 57 | Аналоги нагрузок вида 45 и 47 в глобальной системе координат |
| Собственный вес | 96 | Задается коэффициент учета собственного веса |
| Учет жестких вставок | 46, 56 | Равномерно распределенная с учетом приложенной на жесткие вставки нагрузки в местной и общей системах координат |
| Собственный вес | 116 | Задается коэффициент учета собственного веса с учетом приложенной на жесткие вставки нагрузки |
| Массы | 85, 86 | сосредоточенные и равномерно распределенные массы по всем направлениям |
| Нагрузки по областям | 220 | равномерно распределенные нагрузки по линии и полилинии |
| | 219 | трапециевидные нагрузки по линии |
| | 216 | равномерно распределенные нагрузки по произвольному многоугольнику, заданному контуром |
| | 217 | трапециевидные нагрузки по треугольнику и четырехугольнику |

**<направление нагрузки>** - цифровое обозначение направления действия нагрузки.

Направления действия нагрузки обозначаются целыми числами — 1, 2, 3 вдоль осей X, Y, Z общей системы координат, либо $X_1$, $Y_1$, $Z_1$ местной системы координат в зависимости от вида нагрузки; а также 4, 5, 6 — угловые направления вокруг тех же осей. Особенности задания нагрузок для динамических воздействий описаны в разд. 33.7. Порядок задания статических и динамических загружений произвольный.

**<список величин нагрузки>**

Узловая сила или момент, а также равномерно-распределенная нагрузка описываются одним числом — их величиной. Местная нагрузка в виде сосредоточенной силы или момента для стержней, например, описывается двумя числами: величиной и привязкой к первому узлу, а для элементов оболочки — тремя числами: величиной и привязками к первому узлу по направлениям местных осей $X_1$ и $Y_1$.

Величины нагрузок, задаваемых на конечные элементы, и порядок их следования указаны при описании элементов в главе 3 и, как правило, соответствуют последовательности их ввода в графическом препроцессоре. Есть особенности при задании температурной нагрузки на пластины и объемные элементы, приведенные в таблицах 33.6-2 и 33.6-3.

**Таблица 33.6-2**

**Температурная нагрузка на плоские элементы**

| Тип КЭ | Документ 6 | | Величины нагрузки в документе 7 | Содержание |
|---|---|---|---|---|
| | вид | направ-ление | | |
| 11-20 | 8 | 0<br>4<br>5 | $\Delta t, \alpha$<br>$\Delta t, \alpha_x$<br>$\Delta t, \alpha_y$ | $\Delta t$ — разность температур на верхней и нижней поверхностях,<br>$\alpha, \alpha_x, \alpha_y$ — коэффициенты линейного расширения по всем направлениям и только по X или Y, соответственно,<br>t — увеличение (уменьшение) температуры среднего слоя пластины по отношению к нормальным условиям эксплуатации (температуре замыкания) |
| 21-30 | 8 | 0<br>1<br>3 | $t, \alpha$<br>$t, \alpha_x$<br>$t, \alpha_z$ | |
| 41-50 | 8 | 0<br>1<br>2<br>4<br>5 | $t, \Delta t, \alpha$<br>$t, \alpha_x$<br>$t, \alpha_y$<br>$\Delta t, \alpha_x$<br>$\Delta t, \alpha_y$ | |
| 11-20<br>21-30<br>41-50 | 88 | 0<br>1<br>2<br>4<br>5 | $t, \Delta t, \alpha$<br>$t, \Delta t, \alpha_x$<br>$t, \Delta t, \alpha_y$<br>$t, \Delta t, \alpha_x$<br>$t, \Delta t, \alpha_y$ | Используется для унификации нагрузки на пластинчатые элементы.<br>Для направлений 1, 2 не учитывается $\Delta t$, для направлений 4, 5 не учитывается t |

**Таблица 33.6-3**

**Температурная нагрузка на объемные элементы**

| Документ 6 | | Величины нагрузок в док.7 | Содержание |
|---|---|---|---|
| Вид | Направление | | |
| 8 | 0<br>1<br>2<br>3 | $t, \alpha$<br>$t, \alpha_x$<br>$t, \alpha_y$<br>$t, \alpha_z$ | t(град) — увеличение (уменьшение) температуры по отношению к нормальным условиям эксплуатации (температуре замыкания),<br>$\alpha$ — коэффициент температурного линейного расширения для изотропного тела,<br>$\alpha_x$, $\alpha_y$, $\alpha_z$ — коэффициенты температурного линейного расширения по осям ортотропного тела. |

Задание нагрузок для динамических загружений приведено в разд. 33.7.

В комплексе **SCAD** принято следующее правило знаков при задании нагрузок:

- положительные сосредоточенные и распределенные силы действуют против соответствующих осей общей либо местной системы координат, а моменты по часовой стрелке, если смотреть с конца осей;
- заданное перемещение считается положительным, если направлено вдоль оси или против часовой стрелки.

Это означает, что векторы перемещений и поворотов, определенные правилом правого винта, совпадают с соответствующими осями, а векторы сил и моментов противоположны им.

**[File=<имя>] –** используется при задании некоторых типов динамических нагрузок. Например, при описании импульса или при прямом интегрировании уравнений движения (см. разд. 15).

### Документы 9 и 10. «Группы нагрузок»

Описание групп нагрузок полностью идентично описанию загружений. Нагрузки, входящие в группы, записываются в документе 9 (аналог документа 6) и документе 10 (аналог документа 7).

## 33.7. Описание схем динамических загружений

При описании динамических загружений необходимо задать следующие данные в документах 6 и 7:

- в документе 6 задать характеристики динамических загружений;

- в документе 7 описать массы, а также задать дополнительные данные, необходимые для расчета на ударные и импульсные воздействия, гармонические колебания и т. п.

## Описание масс в документах 6 и 7

Для всех видов динамических воздействий в документе 7 необходимо описать массы, которые задаются как веса в тоннах, т. е. масса, умноженная на ускорение свободного падения. В программе предусмотрено автоматическое формирование масс на основе местных нагрузок одного либо нескольких статических загружений. Массы можно задать в виде специальной местной нагрузки, предназначенной только для описания масс, или в виде сосредоточенных узловых сил.

Допускается три способа описания масс (в том числе и в одном загружении):

- в виде узловых сосредоточенных сил;
- как местная нагрузка вида 4 на элементы расчетной схемы с указанием в позиции, используемой для признака направления действия нагрузки, индекса 0 — для равномерно-распределенных и 1 — для сосредоточенных нагрузок (нагрузки вида 4 0 и 4 1);
- с автоматическим преобразованием статических нагрузок в массы (нагрузки вида 4 3).

Массы (задаются их веса) формируют инерционные силы, соответствующие поступательным смещениям узла X, Y, Z. Угловым перемещениям узлов соответствуют инерционные моменты, и для их учета задаются моменты инерции масс, сосредоточенных в этих узлах.

Сосредоточенные узловые массы описываются как обычные узловые нагрузки. При их задании следует назначать соответствующие признаку схемы степени.

### *Автоматическое формирование масс*

В комплексе **SCAD** предусмотрено автоматическое формирование массы для динамических загружений на основе статических загружений (нагрузки вида 4, направление 3). В этом случае общий вид строки документа 7 будет следующим:

**4 3 Load=k r : <список загружений>/**,

Где 4 3 — код вида и направления нагрузки;

k — номер динамического загружения, для которого задаются массы;

r — коэффициент, на который умножаются веса в статических загружениях при формировании масс;

**<список загружений>** — список статических загружений, из которых формируются массы.

## Характеристики динамических загружений

В главе 8 приведен перечень модулей динамики, реализованных в настоящее время в комплексе **SCAD**. Характеристики динамических воздействий зависят от модуля динамики и записываются в документе 6, который составлен так, что содержание первых 3-х позиций для всех видов динамических воздействий одинаково и означает:

- *позиция 1* — номер модуля (вид) динамического воздействия, который определяет характер следуемой за ним информации;
- *позиция 2* — максимальное число форм собственных колебаний, которые необходимо учесть в расчете;
- *позиция 3* — для модулей 21 и 31 (пульсация ветрового потока) — номер ветрового статического загружения, для всех остальных видов загружений — ноль.

С 4-й позиции следует информация, зависящая от модуля динамики. Так как задание характеристик динамических воздействий гораздо проще сделать в графическом препроцессоре, не будем подробно описывать их заполнение. Отметим только, что в них указываются как коэффициенты, зависящие от выбранных нормативных документов, так и имена файлов акселерограмм или графиков спектров динамичности (см. разд. 0).

## Задание импульсных нагрузок

Импульсные воздействия при использовании модулей динамики 22 и 42 описываются в документе 7 как обычные узловые сосредоточенные силы с заданными направлениями воздействия, но вместо одного числа записываются следующие числа:

**Q P|A *f* τ|0 $T_0$ n F/** ,

где **Q** — вес массы, в узле (задается равным 0, если масса уже описана в другом месте или импульс приходит в точку, в которой масса не задана);

**P** или **A** — усредненная величина импульса в Т·сек, если номер формы импульса задан положительным числом от 1 до 6, или амплитуда импульса при значениях номера от 11 до 16;

***f*** — номер формы импульса (см. рис. 2.4-1). Если номер равен 100, то форма импульса находится в файле, имя которого дано после идентификатора **FILE**;

**τ|0** — продолжительность импульсного или ударного воздействия, сек. При нулевом значении импульс считается мгновенным;

**$T_0$** — период повторения воздействия, сек;

**n** — количество повторений. В случае одного импульса может не задаваться;

**F** — время начала действия импульса, сек. По умолчанию — 0.

Последние четыре числа могут не задаваться.

Если форма импульса задается с помощью графика, то он должен находиться в текстовом файле с расширением **.spi**. Его структура приведена ниже.

В процессе расчета формируется файл с расширением **.p30**, который содержит заданные и вычисленные характеристики импульсов. Например:

```
Загружение - 3
узел   направл. импульс  время  амплитуда  период  фаза  кратность имя файла
2       3       2.000    104.72  2.000     52.360  0.000  1         гармоника
Загружение - 4
узел  направл. импульс  время   амплитуда  период  фаза  кратность имя файла
2      3       2.602    100.00   2.000     0.000  0.000  1
```

## Задание ударных нагрузок

Удар описывается в документе 7 как обычные узловые сосредоточенные силы с заданными направлениями воздействия, записываются следующие числа:

**Q M V T R A/**,

где **Q** — вес массы, приходящейся в узел. Можно задавать ее равной 0, если эта масса уже описана, в другом месте или удар приходится в точку, в которой масса не задана;

**M** — вес массы ударяющего тела. Если после удара масса ударяющего тела присоединяется к конструкции, то ее необходимо добавить к первому числу;

**V** — скорость в момент удара м/сек;

**T** — время удара (сек). При нулевом значении удар считается мгновенным;

**R** — коэффициент восстановления при ударе;

**A** — угол (в радианах) между направлением удара и нормалью к площадке, на которую он действует (только для модуля 33).

## Файлы с параметрами импульсов

Текстовый файл с описанием импульса имеет расширение **.spi** и содержит следующую информацию:

- комментарий (обязательно), который заканчивается символом «#» ;
- коэффициент масштабирования;
- тип информации, который может принимать следующие значения:

  0 — P(A) является коэффициентом масштабирования к величинам, задаваемым графиком. При этом по оси времени график масштабируется на заданное значение τ;

  1 — P(A) является величиной импульса, тогда площадь графика будет равна заданной величине P, а время действия — τ;

  2 — P (A) является амплитудой графика импульса, а время действия — τ;

  3 — считается, что с помощью графика заданы известные ускорения массы за счет внешнего воздействия. При этом график нормируется аналогично типу 2, но заданные величины умножаются еще и на массу, находящуюся в узле по направлению импульсного воздействия;

- последовательность из пар чисел, первое из которых — значение времени, а второе, — соответствующая ему величина импульса. Очевидно, что начальная точка — нуль.
  Пример файла с формой импульса:

```
Test
#
1 0
0.000000 0.000000      0.050000 0.006000    0.100000 0.012000    0.150000 0.017999
0.200000 0.023998
0.250000 0.029996      0.300000 0.035992    0.350000 0.041988    0.400000 0.047982 …
```

### Документ 71. «История нагружения»

Включает данные для модуля прямого интегрирования уравнений движения (см. главу 15).

## 33.8. Вспомогательные документы

### Документ 21. «Координационные оси»

В этом документе задаются параметры координационных (разбивочных) осей. Строка документа имеет следующий вид:

**<направление> <имя> <координата>**

где признак направления имеет следующие значения:

1 — для осей продольной разбивки (как правило, это цифровые оси);
2 — для осей поперечной разбивки (как правило, это буквенные оси);
3 — для отметок по высоте.

Имя оси заключается в кавычки (для отметок — оно совпадает со значением координаты), а значение координаты соответствует:

- для отметок — координате по оси Z;
- для цифровых осей — координате по оси X;
- для буквенных осей — координате по оси Y.

Пример заполнения документа 21.

```
(21 /
   1 "1"    0./
   1 "2"   7.8/
   1 "3"   15./
   2 "А"    0./
   2 "Б"   2.4/
   2 "В"   7.2/
   3 "0"    0./
   3 "3.3" 3.3/)
```

### Документ 27. «Контур триангуляции»

В этом документе задаются группы узлов, составляющие контуры триангуляции. Каждая строка документа содержит описание одного контура, сохраненного при выполнении триангуляции, и имеет следующий вид:

**Name <имя контура>: <список узлов>**

где **Name** — ключевое слово, после которого следует в кавычках **имя контура** триангуляции;

**список узлов** — номера узлов, образующих точки перегиба контура (номера первого и последнего узлов совпадают).

Пример:

```
(27/ Name="Контур №  1": 1 149 164 16 1/
     Name="Контур №  2": 10 5 15 11 28 10/...)
```

### Документ 47. «Группы элементов»

Каждой группе элементов соответствует в документе одна запись вида

**<назначение группы><тип>** [Name=<имя>]:<список элементов>

В первой позиции записи стоит признак, указывающий на назначение группы (1 — группа предназначена для постпроцессора подбора арматуры; 2 — группа общего назначения). Во второй позиции — вид элементов в группе (0 — произвольно; 1 — стержни; 2 — пластины). Вторая позиция используется только в группах, предназначенных для постпроцессора подбора арматуры.

### Документ 48. «Группы узлов»

Каждой группе узлов соответствует в документе одна запись вида

**2 0:** [Name=<имя>]:<список элементов>

Она включает признак типа группы (2) и вид операции с узлами (0).

## 33.9. Документы Монтажа

Основные данные для режима **Монтаж** (гл. 14) находятся в документе 72 **Режим Монтажа**. Каждая строка данного документа имеет вид:

**Name <имя этапа> LoadBase <базовое загружение>**
**Elem <список элементов>; Load <список загружений>;**
**{LoadGroup <список групп загружений>;]**
**[Type<учет деформации схемы на предыдущем этапе>] /**

Кроме этого, могут появиться следующие группы элементов для этапов монтажа:

- 1005, 2005, … – связи;
- 1002, 2002, … – условия примыкания;
- 1034, 2034, … – коэффициенты постели;
- 1073, 2073, … – коэффициенты изменения жесткостей.

Первая часть числа описывает номер стадии монтажа. Документы **Связи** и **Коэффициенты постели** полностью аналогичны описанным ранее. Строки документов **Коэффициентов изменения жесткостей** имеют следующую структуру:

**<коэффициент> : <список элементов> / .**

## 33.10.Документы для проверки и подбора сечений из стального проката

К документам, на основании которых производится проверка и подбор сечений из стального металлопроката, относятся:

28 – «Проверка и подбор сечений из стального проката»;

29 – «Унификация при подборе сечений из стального проката».

Они имеют сложную структуру, и поэтому их рекомендуется задавать с помощью графического постпроцессора.

## 33.11.Документы для армирования сечений ж/б элементов и его проверки

К документам, на основании которых производится проверка и подбор арматуры, относятся:

53 – «Армирование сечений ж/б элементов»;

74 –«Заданное армирование плит»;

75 - «Заданное армирование стержней».

Они имеют сложную структуру, и поэтому их рекомендуется задавать с помощью графического постпроцессора.

## 33.12.Исходные данные постпроцессоров

### Документы расчетных сочетаний

Информация задается в документах 61, 62, 63 и 64. В документе 61 задаются (см. рис. 18-12):

**<характеристики загружения> :**
**<список одновременно действующих>;**

**<список взаимоисключающих>;**
**<список сопутствующих> /**

Характеристики загружения включают:

- тип загружений;
- вид загружения;
- номер крана;
- режим крана;
- признак активности (учета) загружения.

Если нет соответствующего списка, то выводится 0.

В документах 62, 63 и 64 выводятся, соответственно, списки элементов для выбора РСУ, группы РСУ и группы унификации.

### Документы расчетных сочетаний для нелинейного расчета

Информация, которая задается в документах 81, 82, 83 и 84, полностью аналогична обычным РСУ.

### Документ 36. «Комбинации загружений»

Документ описывает комбинации загружений. В каждой строке документа в порядке следования номеров загружений записаны значения коэффициентов, с которыми соответствующее загружение входит в комбинацию. Начиная со второй комбинации, количество коэффициентов увеличивается на единицу, т.к. предыдущие комбинации могут входить на правах загружений в последующие со своими коэффициентами.

Пример заполнения документа 36.

```
(36/
1.  1.  0.  0.  0.  0.  1./
1.  0.  1.  0.  0.  1.  0.  0./
1.  1.  1.  1.  1.  1.  1.  0.  0./)
```

### Документ 37. «Устойчивость»

Документ содержит одну строку, в которую записываются следующие данные:

- позиция 1 — содержит признак, нулевое значение которого указывает на то, что анализ устойчивости выполняется по загружениям, а единица — по комбинациям загружений;
- позиция 2 — единица в этой позиции означает, что в процессе анализа необходимо определить коэффициент запаса устойчивости;
- позиция 3 — единица в этой позиции означает, что в процессе анализа необходимо определить формы потери устойчивости;
- позиция 4 — единица в этой позиции означает, что в процессе анализа необходимо вычислить свободные длины элементов;
- позиция 5 — значение, определяющее верхнюю границу поиска коэффициента запаса устойчивости;
- позиция 6 — значение, определяющее точность вычислений;
- позиция 7 — количество загружений или комбинаций загружений в задаче;
- позиция 8 — номера загружений или комбинаций, для которых выполняется анализ устойчивости.

Пример заполнения документа 37.

```
(37/ 0  1  1  1   2.  .01   4  1  2  3  4/)
```

### Документ 38. «Главные и эквивалентные напряжения»

В этом документе записываются данные, которые используются для управления режимом вычислений главных и эквивалентных напряжений. Ниже приводится назначение позиций в строке этого документа:

- позиция 1 — не используется (всегда 0);

- позиция 2 — единица в этой позиции означает, что будет выполняться расчет главных напряжений по загружениям;
- позиция 3 — единица в этой позиции означает, что будет выполняться расчет главных напряжений по комбинациям загружений;
- позиция 4 — единица в этой позиции означает, что будет выполняться расчет напряжений по загружениям;
- позиция 5 — единица в этой позиции означает, что будет выполняться расчет эквивалентных напряжений по комбинациям загружений;
- позиция 6 — в этой позиции задается индекс теории прочности, в соответствии с которой будут выполняться расчеты. Индексы соответствуют:
  1 — теория наибольших нормальных напряжений;
  2 — теория наибольших линейных деформаций;
  3 — теория наибольших касательных напряжений;
  4 — энергетическая теория Губера, Хенки, Мизеса;
- позиции 7–12 — резервные позиции (заполняются нулями).

Пример заполнения документа 38.

```
(38/ 0 1  1  1  1   4  0  0.  0.  0.  0.  0/)
```

## Документ 39. «Нагрузки от фрагмента схемы»

В документе записываются данные для выполнения расчета нагрузок от фрагмента схемы. Информация включает строку с параметрами настройки режима, строку с номерами элементов, составляющими фрагмент, а также дополнительно по одной строке данных для каждого участка схемы, со списками узлов в которых вычисляются нагрузки. В первой позиции каждой строки с описанием участков записывается значение угла разворота участка относительно оси X общей системы координат.

Пример заполнения документа 39.

```
(39/
1  1  1/
1-456 461-684/
30.0 253/
0.0  13 21 73/
60.0  1 2 53 79/)
```

## Документ 53. «Армирование железобетонных элементов»

Документ имеет сложную структуру и позволяет сохранить данные для армирования при экспорте/импорте текстового файла.

## Документ 70. Прогрессирующее обрушение

Включает следующую информацию:

- уровень оценки: 0 – осторожная, 1 – нет;
- номер комбинации;
- номер группы нагрузок;
- признак сохранения задачи прогрессирующего обрушения с дополнением в имя **.dst**;
- коэффициент динамичности (по умолчанию 2);
- коэффициент для падающих конструкций (группы);
- интервал неопределенности, в котором еще держит элемент;
- тип расчета: 0 – линейный, 1 – нелинейный;
- метод нелинейного расчета: 0 – простой шаговый, 1 – шагово-итерационный, 2 – итерационный;
- число шагов;
- максимальное число итераций.

## 33.13.Специальные системы координат

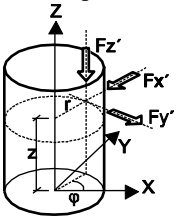
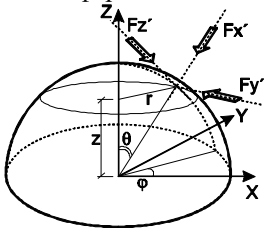
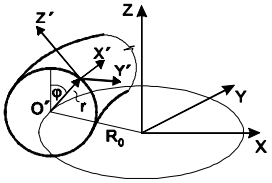
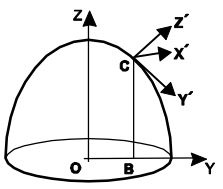
Строка 3 документа 0 вводится в тех случаях, когда необходимо преобразовать координаты узлов, заданные в документе 4. Можно использовать цилиндрическую, сферическую и др. системы координат.

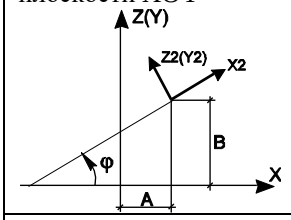
Информация в строке задается в виде списков, имеющих следующую структуру:

**<признак типа преобразования> [: <список узлов>]**
**[: <численные характеристики преобразования>];**

Заданные в строке 3 преобразования координат можно использовать и при задании нагрузок в этих же системах координат. Если список узлов не задан, то это означает, что преобразование относится ко всем узлам. Допустимые типы преобразований и необходимые для них численные характеристики приведены в таблице 33.13-1. Если в графе **Тип** указаны два числа, то для первого типа углы задаются в градусах, а для второго — в радианах.

**Таблица 33.13-1**

| Наименование | Тип | Координаты | Направления осей нагрузок | Численные характеристики |
|---|---|---|---|---|
| Цилиндрическая  | 1(11) | r — полярный радиус;<br>φ — полярный угол в радианах (градусах);<br>z — аппликата | X′ — по радиусу от центра;<br>Y′ — по касательной против часовой стрелки, если смотреть с конца оси Z;<br>Z′ — совпадает с осью Z | Нет |
| Сферическая  и тороидальная  | 2(12) | r — полярный радиус;<br>φ — полярный угол в радианах (градусах);<br>ψ — угол наклона радиуса от вертикальной оси в радианах (градусах) | X′ — по радиусу от центра;<br>Y′ — по параллели против часовой стрелки, если смотреть с конца оси Z;<br>для тора — по окружности, параллельной плоскости XOY;<br>Z′ — по меридиану, составляя с X′ и Y′ правую тройку | $R_0$ — для тороидальной |
| Растяжение (сжатие) вдоль осей координат | 3 | | | **$Q_1$ $Q_2$ $Q_3$** — коэффициенты растяжения (сжатия) вдоль осей X, Y, Z, соответственно |
| Квадратичная поверхность переноса  | 4 | $X_2 = X$;<br>$Y_2 = Y$;<br>$Z_2 = AX^2+BY^2+C$ | Z′ — перпендикулярна поверхности и составляет с осью Z угол, меньший 90°;<br>Y′ — перпендикулярна $Z_2$ и лежит с осью Z в одной плоскости, составляя с осью Z угол больше 90°;<br>X′ — перпендикулярно $Y_2$ и $Z_2$;<br>Тройка $X_2$, $Y_2$, $Z_2$ — правая | |

| Наименование | Тип | Координаты | Направления осей нагрузок | Численные характеристики |
|---|---|---|---|---|
| Перенос координат в пространстве | 5 | $X_2 = X + A;$<br>$Y_2 = Y + B;$<br>$Z_2 = Z + C$ | | A B C |
| Афинное преобразование | 6 | $X_2 = L_{11} X + L_{12} X + L_{13} X;$<br>$Y_2 = L_{21} Y + L_{22} Y + L_{23} Y;$<br>$Z_2 = L_{31} Z + L_{32} Z + L_{33} Z$ | | $L_{11}$ $L_{12}$ $L_{13}$<br>$L_{21}$ $L_{22}$ $L_{23}$<br>$L_{31}$ $L_{32}$ $L_{33}$ |
| Перенос с поворотом в плоскости XOY   | 7(17) | $X_2 = X \cos\varphi - Y \sin\varphi + A;$<br>$Y_2 = X \sin\varphi - Y \cos\varphi + B;$<br>$Z_2 = Z$ | | φ A B |
| Перенос с поворотом в плоскости XOZ | 8(18) | $X_2 = X \cos\varphi - Z \sin\varphi + A;$<br>$Y_2 = Y;$<br>$Z_2 = X \sin\varphi + Z \cos\varphi + B$ | | φ A B |
| | 9 | $X_2 = X;$<br>$Y_2 = Y;$<br>$Z = \sqrt{A \cdot x^2 + B \cdot y^2 + C}$ | | A B C |
| Поверхность переноса | 10 | $X_2 = X;$<br>$Y_2 = Y;$<br>$Z = \sqrt{A \cdot x + B \cdot y + C}$ | | A B C |

## 33.14.Задание нагрузки в специальных системах координат

С помощью документов 6 и 7 возможно задание нагрузки в специальных системах координат. Нагрузки вида 2 задаются для узлов, координаты которых задавались в специальных системах координат, а вида 3 — для любых узлов.

Для каждого узла, координаты которого заданы в специальной системе координат, может быть задана и узловая нагрузка в этой системе координат. Для этого во второй позиции документа 6 записывается признак 2 (вид нагрузки). В позиции 3 документа 6 задается номер направления нагрузки: 1, 2, 3 — соответственно, вдоль осей $X_2$, $Y_2$, $Z_2$; 4, 5, 6 — вокруг тех же осей.

В документе 7 задаются величины узловых нагрузок. Положительный знак соответствует действию против местных осей координат и повороту по часовой стрелке, если смотреть с конца соответствующей местной оси.

Вид нагрузки 3 используется при задании нагрузок в специальных системах координат для узлов, заданных в общей системе координат. В документе 7 помещается необходимая для преобразования информация. Направление нагрузки в документе 6 задается аналогично направлению для нагрузки вида 2.

Реализованы две системы координат для нагрузки вида 3:

- *цилиндрическая*, для которой в документе 7 задается следующая информация:

***f*  1  [A  B]**

где ***f*** — величина нагрузки, направление которой в местной системе координат описано в документе 6;

**1** — признак цилиндрического преобразования;

**A**, **B** — координаты центра цилиндра на плоскости XOY. Если они не заданы, то считается, что ось цилиндра находится на оси Z.

- *сферическая*, для которой в документе 7 задается следующая информация:

***f*  2  [A  B  C]**,

где ***f*** — величина нагрузки, направление которой в местной системе координат описано в документе 6;

**2** — признак сферического преобразования;

**A**, **B**, **C** — координаты центра шара в пространстве. Если они не заданы, то считается, что шар находится в центре координат.



**Поскольку в документе 7 количество информации в одной строке ограничено четырьмя числами, то для задания пяти характеристик, необходимых для назначения нагрузок в сферической системе координат, должна быть использована более чем одна строка.**

# 34. Сервисные функции

К сервисным относятся не только специальные функции раздела меню ***Сервис***, но и целый ряд других, позволяющих сохранить образ экрана, сохранить описание расчетной схемы в текстовом формате и другие.

## 34.1. Сохранение фрагмента



Операция записи фрагмента вызывается из раздела **Управление** инструментальной панели и позволяет сохранить фрагмент расчетной схемы (выделенный с помощью функций фрагментирования, описанных в разд. 10.1) как отдельную схему. При этом новая схема будет включать все атрибуты фрагмента (жесткости, связи, нагрузки и т. п.). Перед сохранением программа задает вопросы о необходимости произвести упаковку данных и пути к сохраняемому файлу. В случае положительного ответа на вопрос об упаковке появляется диалог с опциями упаковки.

Операция доступна только из препроцессора.

## 34.2. Определение площади, периметра и углов полигонов



Эта операция позволяет определить характеристики плоского полигона, ограниченного отрезками прямых, проходящими через узлы расчетной схемы. Для выполнения операции следует:

- нажать одноименную кнопку инструментальной панели **Управление**;
- протянуть «резиновую нить», отмечая узлы, являющиеся вершинами полигона, нажатием левой кнопки мыши;
- после выбора последней вершины закончить ввод двойным нажатием левой кнопки мыши.

Изображение полигона и его характеристики будут показаны в диалоговом окне (рис. 34.2-1). Цвет полигона совпадает с цветом, заданным для контура триангуляции, фон — с цветом фона расчетной схемы, а номера узлов — с цветом номеров узлов. Величины углов показаны тем же цветом, что и величины нагрузок. Характеристики полигона сведены в таблицу и могут экспортироваться в MS WORD® или MS EXCEL®.

При вводе полигона повторная отметка узла «отцепляет» от него «резиновую нить».

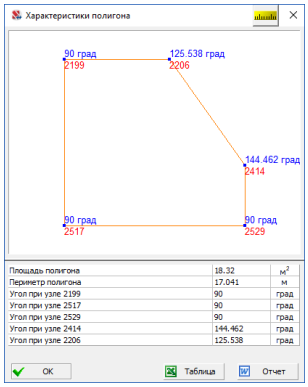



Рис. 34.2-1. *Диалоговое окно* **Характеристики полигона**

Стрелка дополнительных возможностей открывает выпадающее меню, в котором можно выбрать следующие операции:

- Площадь отмеченных пластин;
- Площадь пластин в видимой части.

## 34.3. Специальные функции раздела меню Сервис

В разделе меню ***Сервис*** предусмотрено обращение к специальным функциям, в число которых входит вызов стандартного калькулятора среды Windows, а также калькуляторы для расчета по формуле и преобразования единиц измерения. Кроме того, из этого раздела меню можно вызвать справочные таблицы с характеристиками бетона и арматуры.

### Калькулятор для расчета по формулам

Калькулятор для расчета по формулам может быть вызван из программной группы **SCAD Office** иконкой  . В разделе меню ***Сервис*** предусматривается возможность вызова как стандартного калькулятора среды MS Windows (если он установлен в системе), так и специального вычислителя (рис. 34.3-1), позволяющего выполнять расчеты по формулам.

Вычислитель предназначен для проведения вычислений по формулам, которые задаются в окне ввода.

При вводе формул следует соблюдать следующие правила:

- наименования функций вводятся строчными буквами латинского алфавита;
- разделителем дробной и целой частей числа является точка;
- арифметические операции задаются символами +, –, *, /, ^ (возведение в степень), например, 2.5*2.5*2.5 записывается как 2.5^3.

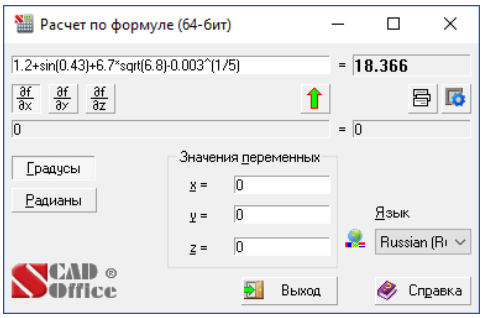



Рис. 34.3-1. *Окно вычислителя*

При записи формул можно использовать следующие функции:
**floor** — наибольшее целое число, не превышающее заданное;
**tan** — тангенс;
**sin** — синус;
**cos** — косинус;
**asin** — арксинус;
**acos** — арккосинус;
**atan** — арктангенс;
**exp** — экспонента;
**ceil** — наименьшее целое число, превышающее заданное;
**tanh** — тангенс гиперболический;
**sinh** — синус гиперболический;
**cosh** — косинус гиперболический;
**ln** — натуральный логарифм;
**log** — десятичный логарифм;
**abs** — абсолютное значение;
**sqrt** — корень квадратный.

В зависимости от состояния переключателя **Градусы/Радианы** аргументы тригонометрических функций (**sin, cos, tan**) и результаты обратных тригонометрических функций (**asin, acos, atan**) приводятся в градусах или радианах, соответственно.

Допускается использование только круглых скобок при произвольной глубине вложенности.

*Пример.*
Формула

$$1,2+\sin(0,43)+6,7\sqrt{6,8}-\sqrt[5]{0,003}$$

должна быть записана следующим образом:

**1.2+sin(0.43)+6.7*sqrt(6.8)–0.003^(1/5)**.

Если в соответствующих окнах ввода задать значения переменных, то появляется дополнительная возможность использовать в формуле три независимые переменные **x, y, z**. Это позволяет проводить серию однотипных вычислений при различных значениях параметров. Например, в этом режиме формула

$$1,2+\sin(x)+6,7\sqrt{6,8}-\sqrt[5]{y}$$

должна быть записана в виде

**1.2+sin(x)+6.7*sqrt(6.8)–y^(1/5)**.

Кроме того, программа позволяет записать в поле ввода формул символическое выражение, зависящее от переменных **x, y, z** и активацией одного из маркеров $\frac{\partial f}{\partial x}$, $\frac{\partial f}{\partial y}$, $\frac{\partial f}{\partial z}$ получить символическое выражение для соответствующей частной производной.

Если в строке ввода (верхней) задана функция от переменных **x, y, z**, то в нижней строке появляется символическое выражение для частной производной по одной из этих переменных в зависимости от того, какой из маркеров ($\frac{\partial f}{\partial x}$, $\frac{\partial f}{\partial y}$, $\frac{\partial f}{\partial z}$) активен.

Операция позволяет сохранить текущее состояние строки с формулой и соответствующие значения переменных, а также загрузить ранее сохраненные данные. После активации операции появляется выпадающее меню, выбор первой позиции которого (**Сохранить**) инициирует сохранение введенной информации. В остальных строках отображаются ранее записанные формулы. Для выбора любой из них достаточно выбрать курсором нужную строку.

Кнопка позволяет вызвать окно настройки для установки числа знаков после запятой при выводе результатов расчета.

## Калькулятор для преобразования единиц измерения

Калькулятор вызывается как из программной группы **SCAD Office** — иконка , так и из меню ***Сервис***.

Программа предназначена для преобразования данных, заданных в различных единицах измерений (рис. 34.3-2). Для выполнения операции необходимо выбрать страницу с соответствующими мерами (**Длина**, **Площадь** и т. д.).

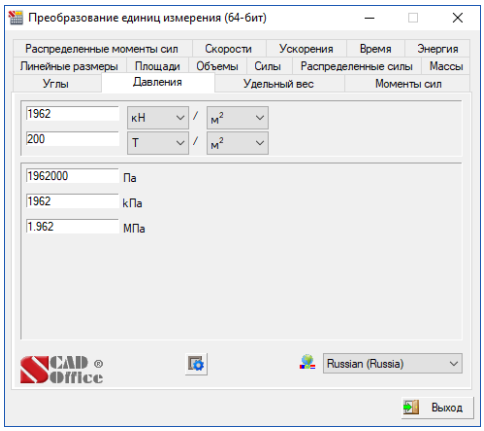



Рис. 34.3-2. *Окно* **Преобразование единиц измерения**

Порядок выполнения операций преобразования зависит от того, являются ли единицы измерения простыми (например, длина, площадь или время) или составными (например, давление, скорость или масса).

Для преобразования простых единиц измерения достаточно ввести число в одно из полей ввода. В результате будут получены значения во всех остальных единицах измерения. Если единицы измерения составные, то следует выбрать в выпадающих списках одной строки наименование единиц, из которых выполняется преобразование, а в списках второй строки — единицы, к которым приводит преобразование. В поле ввода первой из строк вводится число, а в поле ввода второй строки отображаются результаты преобразования.

Активация соответствующего пункта позволяет сменить язык общения (русский/английский).

## Характеристики бетона

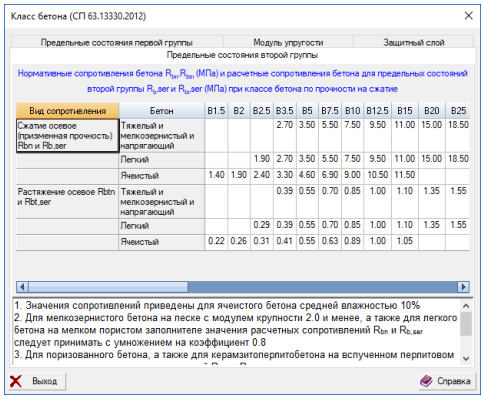



Рис. 34.3-3. *Окно* **Класс бетона**

Многостраничное окно этого режима (рис. 34.3-3) включает данные, представленные в разделе 2 (таблицы 12, 13 и 18) СНиП 2.03.01-84* (таблицы 5.1, 5.2 и 5.4 СП 52-101-2003, таблицы 6.7, 6.8 и 6.11 СП 63.13330), а также информацию о минимально допустимом защитном слое бетона.

## Характеристики арматуры

В этом режиме (рис. 34.3-4) представлены данные о классах арматуры, а также информация о сортаменте арматуры, включающая расчетную площадь поперечного сечения при различном количестве стержней, теоретическую массу одного погонного метра и диаметры арматуры различного класса. Кроме того, на отдельной странице представлена информация об арматурных сетках согласно ГОСТ 23279-85 и о минимальных расстояниях между стержнями в сварных каркасах и сварных сетках. На последней странице приведена информация о соотношении между диаметрами свариваемых и вязаных стержней в арматурных сетках и каркасах (в соответствии с *Руководством по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из тяжелого бетона (без предварительного напряжения)*).

Отдельная страница предназначена для преобразования площади сечения арматуры в стержни, подбора количества стержней, а также размещения арматурных стержней в сечении элемента.

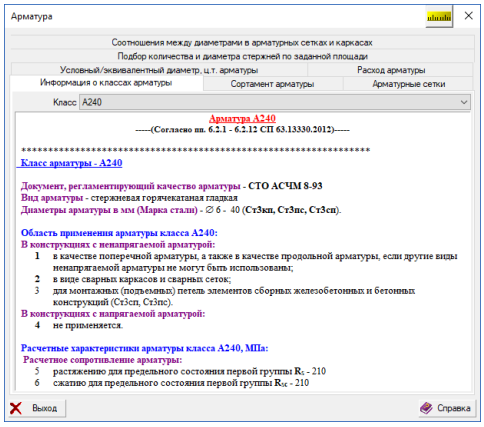



Рис. 34.3-4. *Окно* **Арматура**

Программа позволяет подобрать как минимально необходимое количество арматуры одного диаметра, так и комбинации стержней. При этом можно получить габарит стержней и схему их размещения в сечении элемента.

Результат может быть получен с некоторым заданным пользователем отклонением (т.е. суммарная площадь подобранных стержней может быть меньше/больше заданной на указанную величину отклонения). При отклонении равном 0% будет находиться ближайшее большее значение суммарной площади стержней определённого диаметра (ограничение отклонения 0% применимо только для одиночных стержней, для комбинации стержней нужно задать некое возможное отклонение).

При этом в алгоритме подбора арматурных стержней заложены следующие ограничения и предположения:

- максимально возможное количество рядов арматуры по высоте – 3 ряда;
- количество арматурных стержней в третьем ряду – 2 шт.;
- в сечении элемента допускается применение до пяти разных диаметров (рекомендуется применять не более двух разных диаметров);
- стержни большего диаметра размещаются в первом ряду в углах сечения. В каждом ряду стержни большего диаметра всегда размещаются по краям;
- площадь сечения арматуры в сечении меньшего стержня не должна быть меньше 25% от площади сечения большего стержня;

- стержни 1-го ряда выравниваются по границе защитного слоя (центры тяжести стержней находятся не на одной линии – для возможности устройства хомута);
- центры стержней 2-го и 3-го рядов располагаются на одной прямой.

Программа позволяет получить отчетный документ. В отчет будут выведены только отмеченные пользователем варианты результатов расчета.

Страница **Условный/эквивалентный диаметр, ц.т. арматуры** открывает доступ к трем вспомогательным операциям:

**Условный диаметр —** предназначен для определения условного диаметра стержня при стесненных условиях размещения двух арматурных стержней (попарно без зазора между ними, либо с расстоянием между стержнями пары менее расстояния, требуемого для отдельных стержней). Такая пара стержней при назначении расстояний между стержнями и при определении длины анкеровки должна рассматриваться как условный стержень диаметром $d_{red} = \sqrt{d_1^2 + d_2^2 - c_1^2}$, где $d_1$ и $d_2$ – диаметры сближаемых стержней, $c_1$ – расстояние между этими стержнями в свету, принимаемое не более диаметра меньшего стержня (см. п. 5.40 и рис. 102 Пособия по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из тяжелых и легких бетонов без предварительного напряжения арматуры (к СНиП 2.03.01.-84)).

**Эквивалентный диаметр —** предназначен для определения эквивалентного диаметра арматурного стержня при определении ширины раскрытия трещин, если в сечении используются стержни разных диаметров.

Для сечения со стержнями $n_1$ диаметром $d_1$ и $n_2$ диаметром $d_2$ эквивалентный диаметр $d_{eq}$ определяется по формуле:

$$d_{eq} = \frac{n_1 d_1^2 + n_2 d_2^2}{n_1 d_1 + n_2 d_2}$$

**Центр тяжести многорядной арматуры —** предназначен для определения расстояния от грани бетона до центра тяжести многорядной арматуры.

Для сечения со стержнями определенного диаметра суммарной площадью $A_{s1}(A_{sn})$, находящимися на расстоянии $a_{s1}(a_{sn})$ от грани элемента центр тяжести при многорядном армировании определяется по формуле:

$$a = \frac{A_{s1}a_{s1} + A_{s2}a_{s2} + ... + A_{sn}a_{sn}}{A_{s1} + A_{s2} + ... + A_{sn}}$$

Страница **Расход арматуры** дает доступ к операции подсчета веса арматуры, суммарной площади поперечного сечения, а также количества арматурных стержней, расположенных на площадке прямоугольной или произвольной формы. Расчет выполняется для набора стержней, имеющих как одинаковый, так и разный диаметры.

В программе реализованы четыре вида расчетов:

- расход арматуры (определение общей площади и общего веса связки из N арматурных стержней);
- расход арматуры на условной полосе, размером a×L;
- расход арматуры на прямоугольной площадке, размером a×b;
- расход арматуры на площадке произвольной формы, площадью A.

Управление операцией выполняется в многостраничном диалоговом окне **Арматура**, которое вызывается из одноименного раздела меню **Сервис**. Вид расчета выбирается путем активации соответствующего маркера на странице **Расход арматуры**, после чего необходимо задать параметры арматуры и, если это необходимо, размеры площадки.

***Расход арматуры связки из N арматурных стержней***

Выполняется расчет общей площади и общего веса заданного количества стержней различного диаметра, в том числе и с учетом нахлеста (задается в % от суммарной длины арматуры). Каждому

диаметру арматуры соответствует одна строка таблицы (рис. 34.3-5). Добавление новых строк или удаление ранее введенных выполняется кнопками **Добавить** и **Удалить** соответственно. Расчет выполняется по нажатию кнопки **Вычислить**. Отчет по результатам расчета формируется нажатием одноименной кнопки.

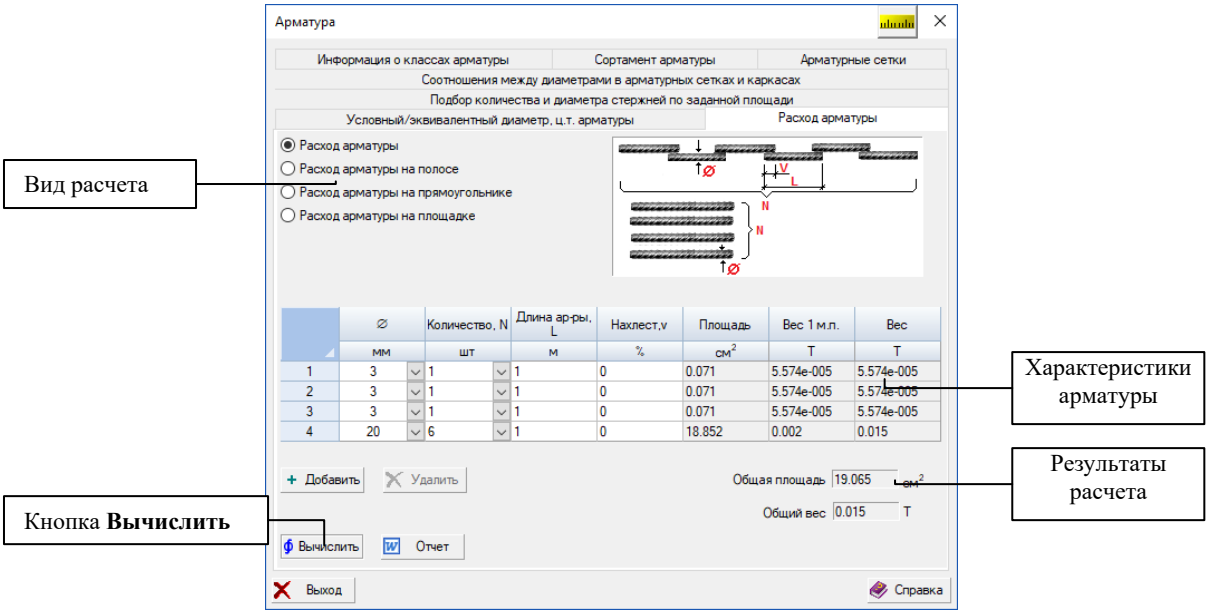



Рис. 34.3-5. *Страница* **Расход арматуры** при вычислении связки из N стержней

### *Расход арматуры на полосе*

Выполняется расчет суммарной длины арматурных стержней, их общего веса и количества стержней, в том числе и с учетом нахлеста (задается в % от длины арматуры), для некоторой условной полосы длиной — **a**. В поперечном направлении полосы арматура может быть представлена как одним стержнем, так и связкой стержней, габаритная длина которого/которой равна — **L**. Расчет выполняется по нажатию кнопки **Вычислить**. Отчет по результатам расчета формируется нажатием одноименной кнопки (рис. 34.3-6).

При учете арматуры на краях полосы к общему количеству стержней добавляется один стержень.

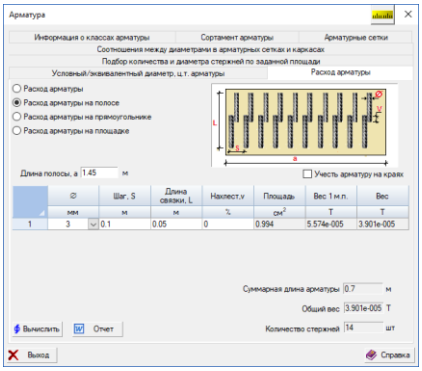


Рис. 34.3-6. *Страница* **Расход арматуры** при вычислении расхода арматуры по полосе

### *Расход арматуры на прямоугольнике*

Выполняется расчет суммарной длины арматурных стержней, их общего веса и количества стержней, в том числе и с учетом нахлеста, для некоторой условной прямоугольной области размерами **a**×**b**. Предусмотрено, что арматура может располагаться как вдоль одной грани, например, **a**, так и вдоль обеих граней. Нахлест задается размером, кратным диаметру арматуры, например, число 10 в графе **Нахлест** соответствует значению 10D, где D — диаметр арматуры.

При учете арматуры на краях прямоугольника к общему количеству стержней добавляются стержни заданной длины, расположенные вдоль грани прямоугольника.

Расчет выполняется по нажатию кнопки **Вычислить**. Отчет по результатам расчета формируется нажатием одноименной кнопки (рис. 34.3-7).

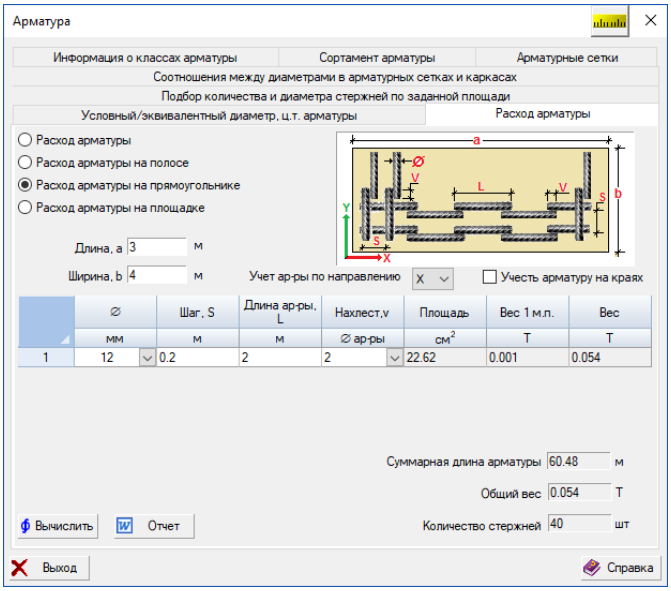



Рис. 34.3-7. *Страница* **Расход арматуры** при вычислении расхода арматуры на прямоугольнике

***Расход арматуры на площадке***

Выполняется расчет суммарной длины арматурных стержней, их общего веса и количества стержней, в том числе и с учетом нахлеста, для некоторой условной площадки, заданной площади. Арматура может располагаться как вдоль одной из осей X(Y), так и вдоль обеих осей. В случае учета нахлеста, его величина задается в % от суммарной длины арматурных стержней.

Расчет выполняется по нажатию кнопки **Вычислить**. Отчет по результатам расчета формируется нажатием одноименной кнопки.

Результаты работы программы можно сохранить в файле с исходными данными с расширением **.sav**, а также получить отчет с результатами расчета.

## 34.4. Импорт и экспорт исходных данных, подготовленных в виде текстового описания

В **SCAD** предусмотрена возможность импорта файлов исходных данных, подготовленных в текстовом формате (см. главу 31), во внутренние форматы текущей версии. Это позволяет использовать ранее подготовленные исходные данные, а для тех, кто предпочитает текстовое описание — готовить часть данных или все данные в виде текстового описания, доводя их до полной готовности средствами графического препроцессора.

Текстовый файл позволяет передать исходные данные в архив в доступном для контроля виде.

Для импорта исходных данных не обязательно наличие в них всех разделов описания схемы. Достаточно только геометрических характеристик (в терминах языка архивации первого и четвертого документов). И даже эта информация может быть неполной. Ее корректировка и дополнение может выполняться средствами графического препроцессора.

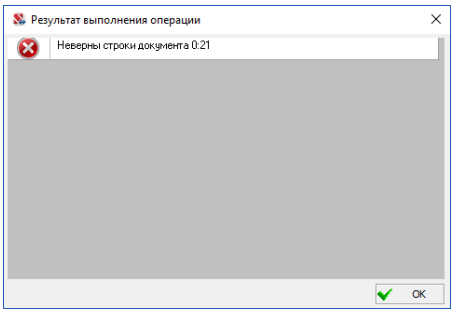



Рис. 34.4-1. *Диалоговое окно* **Результат выполнения операции**

Импорт данных выполняется из раздела меню ***Файл*** операцией **Прочитать проект из текстового формата**. Для преемственности версий предусмотрена операция **Прочитать проект из текстового формата (предыдущие версии)**, с помощью которой импортируются данные, подготовленные в версиях комплекса 11.5.

После активации нужной операции и выбора (в стандартном диалоговом окне имени текстового файла) выполняется импорт, информация о котором помещается в диалоговое окно **Результат выполнения операции** (рис. 34.4-1). В окне сообщается об ошибках и неточностях в данных, приводятся сообщения с описанием ошибок.

Если ошибки не критичны для задачи, то после нажатия кнопки **OK** следует (в стандартном диалоговом окне) выбрать путь к новому spr-файлу и задача становится доступной для работы. Кроме того, будет задан вопрос о необходимости показать протокол операции импорта. В случае положительного ответа будет открыт соответствующий файл протокола.

В комплексе предусмотрен и обратный процесс — экспорт данных, т. е. преобразование из формата проекта в текстовое описание в кодировке Windows. Эта операция называется **Сохранить данные в виде текста** и доступна из раздела меню ***Файл***.

При импорте данных из текстового формата используется система единиц, указанная в данных (см. раздел 33.3 данной книги). При экспорте данных в текстовый формат можно указать требуемую систему единиц измерений.

## 34.5. Комментарии к проекту

Раздел меню ***Файл*** можно использовать для записи комментариев по ходу создания расчетной схемы, а при необходимости — для сохранения вместе с комментариями и текущего состояния проекта, т. е. ведения архива «промежуточных» проектов. Главной особенностью архива является то, что все экземпляры проекта находятся в том же файле, что и основной проект и сохраняются до тех пор, пока не будут сознательно удалены из архива или не будет удален файл основного проекта. Ввод и сохранение комментариев выполняется в диалоговом окне **Комментарии к проекту** (рис. 34.5-1), которое содержит таблицу с текстами комментариев и кнопки управления процессом их архивации.

Таблица включает три графы, в первой из которых записывается дата и время ввода комментариев, вторая предназначена для ввода текста, а в третьей показывается признак наличия в архиве экземпляра проекта, соответствующего времени ввода комментария.

Для работы с архивом проектов используются четыре кнопки:

- **Добавить комментарий без сохранения проекта в архиве** — после нажатия этой кнопки в архиве запоминается комментарий, введенный во второй графе таблицы;
- **Добавить комментарий и сохранить проект в архиве** — здесь кроме сохранения комментария в архив записывается и текущее состояние проекта;

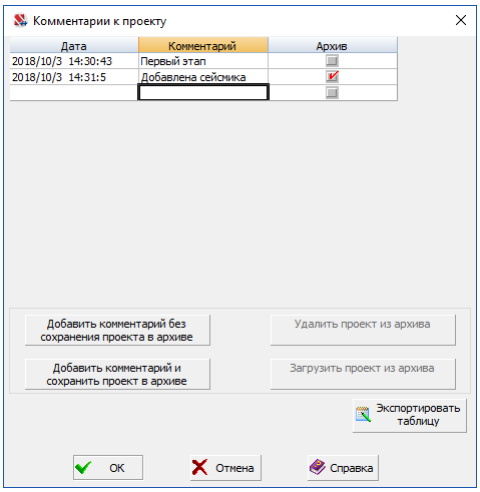



Рис. 34.5-1. *Диалоговое окно* **Комментарии к проекту**

- **Удалить проект из архива** — из архива удаляется проект, соответствующий предварительно отмеченной строке таблицы, а комментарий остается;
- **Загрузить проект из архива** — выполняется загрузка проекта, соответствующего предварительно отмеченной строке таблицы, как отдельной расчетной схемы (при загрузке следует задать имя файла нового проекта, отличное от имени файла исходного проекта).

Все комментарии к проекту могут быть оформлены в виде RTF-файла (кнопка **Экспортировать таблицу**) и автоматически загружены в указанный в параметрах настройки текстовый редактор.

## 34.6. Просмотр сортаментов металлопроката



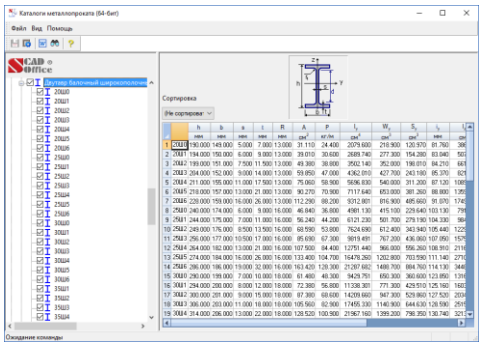


Рис. 34.6-1. *Окно программы просмотра сортаментов*

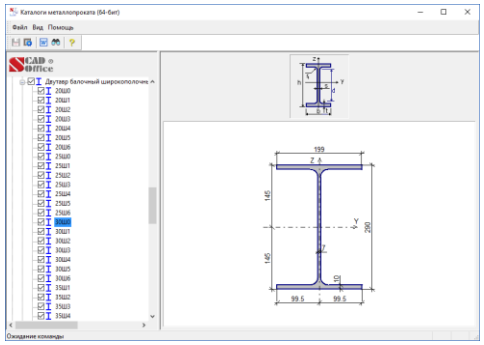


Рис. 34.6-2. *Отображение профиля*

Эта программа вызывается из папки **SCAD Office** на рабочем столе и используется для просмотра сортаментов металлопроката. Окно программы (рис. 34.6-1) включает список сортаментов и таблицу с характеристиками профилей.

Для активации таблицы со списком профилей определенного вида следует раскрыть список профилей нужного сортамента и выбрать в нем наименование группы необходимого вида профилей.

Для получения изображения профиля с конкретными размерами необходимо раскрыть список группы профилей и выбрать из него нужный профиль (рис. 34.6-2).

Слева от наименования сечений в списке установлены маркеры, находящиеся «по умолчанию» в активном состоянии. Деактивация маркеров приводит к исключению указанных таким образом профилей из списка, который используется при подборе в режиме проверки сечений элементов стальных конструкций, хотя и не исключает назначение этого профиля при задании жесткостей элементов.

Таблицы сечений могут быть отсортированы в порядке возрастания значений различных характеристик. Выбор характеристики выполняется из выпадающего списка **Сортировка**. По умолчанию порядок следования сечений в списке соответствует принятому в стандарте (или каталоге).

При необходимости выбранная таблица профилей может экспортироваться в форматах **RTF**-файла в редак- ассоциированный с этим форматом (кнопка **Печать** — ). Если при вызове печати выбрана была не группа профилей, а наименование сортамента, то на печать выводятся все таблицы профилей этого сортамента.

Настройка параметров (кнопка **Параметры** — ) режима просмотра и печати выполняется по тем же

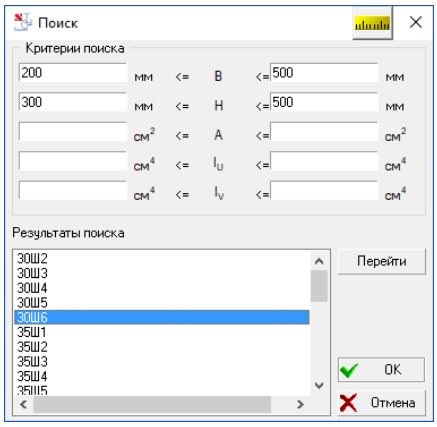



Рис. 34.6-3. *Диалоговое окно* **Поиск**

правилам, что и для комплекса **SCAD**.

Для поиска профиля по значениям основных геометрических характеристик (кнопка **Поиск** —  ) используется одноименное диалоговое окно (рис. 34.6-3). В полях ввода группы **Критерии поиска** записываются значения (минимальные и максимальные) характеристик профиля, по которым осуществляется поиск. Нажатие кнопки **ОК** инициирует поиск. Если найден один или несколько профилей с заданными характеристиками, то их наименования выводятся в списке **Результаты поиска**.

После отметки одного из выбранных профилей в списке и нажатия кнопки **Перейти** указанный профиль будет выделен в таблице с характеристиками сечений.

## 34.7. Графический редактор

Графический редактор, который вызывается нажатием кнопки  , позволяет задать расчетную схему стержневой конструкции или ее фрагмент с помощью набора графических операций, напоминающих среду 2D AutoCAD (AutoCAD Light).

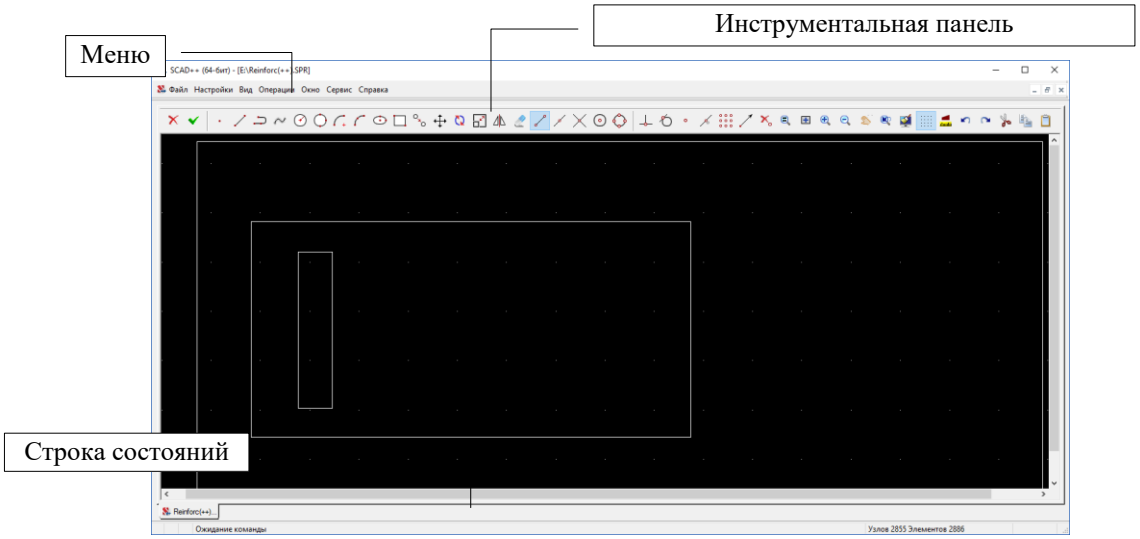



Рис. 34.7-1. *Общий вид окна графического редактора*

Следует отметить, что в графическом редакторе в составе **SCAD** не используются операции, связанные с оформлением чертежей, простановкой размеров и т. п. В связи с этим часть настроек и операций могут оказаться недоступными. Авторы системы не ставили своей целью подменить такие признанные графические средства, как AutoCAD, Micro Station и им подобные. Цель была скромнее — дать возможность знатокам и любителям указанных графических систем работать в знакомой среде. Поскольку правила "рисования", реализованные в графическом редакторе, достаточно стандартные, мы ограничимся ниже кратким перечислением объектов, ввод которых реализован в программе:

*Точка* — рисование точки  ;

*Линия* — рисование линии  ;

*Полилиния* — рисование полилинии  ;

*Сплайн* — рисование сплайна  ;

*Окружность* — рисование окружности (по заданным центру и радиусу  , по заданным трем точкам);

*Дуга* — рисование дуги (  центр, начало и конец,  начало, середина и конец);

*Эллипс* — рисование эллипса  ;

*Прямоугольник* — рисование прямоугольника  .

### Выбор

Выбор можно выполнять точечным указанием на объект (*Точкой*), путем охвата нужных объектов прямоугольной *рамкой*, произвольным многоугольником (*Полигоном*) или *полилинией*.

### Объектная привязка

Имеются следующие возможности установки правил привязки одного объекта к другому:

*Точка* — привязка к объекту типа точка  ;

*Конец* — привязка к началу или концу линии  ;

*Середина* — привязка к середине линии  ;

*Центр* — привязка к центру окружности  ;

*Ближайшая* — привязка к ближайшей позиции линии  ;

*Ручки* — привязка к ручкам  ;

*Пересечение* — привязка к точке пересечения линий  ;

*Перпендикуляр* — привязка к перпендикуляру  ;

*Касательная* — привязка к касательной  .

Привязки курсора — это средства для точного позиционирования.

Если не заданы привязки, то точно установить курсор на определенную точку схемы практически невозможно (пространство схемы в графическом редакторе носит непрерывный характер вещественных координат).

### Полярное отслеживание



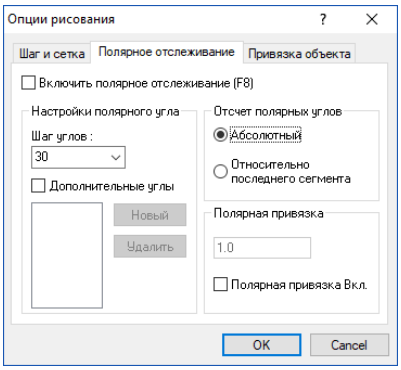



Рис. 34.7-2. *Диалоговое окно* **Опции рисования** *страница* **Полярное отслеживание**

Использование полярной (рис. 34.7-2) привязки позволяет выполнять построение линий, проводя их под заданным углом и заданной длины.

В поле **Шаг углов** задается единичный угол в градусах. Это означает, что линию можно провести под любым углом, кратным заданному шагу.

## Ввод графических объектов

При формировании расчетной схемы в графическом редакторе можно использовать такие объекты, как точка, линия, полилиния, сплайн, окружность, дуга, эллипс, прямоугольник.

Ввод всех объектов выполняется с помощью курсора-перекрестья. Если операция ввода не активна, то перекрестье курсора окружено «малым» квадратом, и в этом режиме он используется для выбора объектов. При включенных привязках перекрестье курсора окружено «большим» квадратом. Прервать ввод объекта можно нажатием на правую кнопку мыши.

### *Точка*



Для ввода последовательности точек необходимо активировать операцию, указать курсором положение точки на схеме и нажать левую кнопку мыши. Если активна опция привязки к сетке (нажата кнопка  ), то точка будет установлена в ближайший к курсору узел сетки.

### *Линия*



В редакторе предусмотрен ввод ломаной линии, который выполняется путем последовательного указания курсором точек перелома и фиксации каждой точки нажатием на левую кнопку мыши. Для прерывания ввода нажимается правая кнопка мыши.

### *Полилиния*



Построение полилинии выполняется при помощи следующих действий:

- нажать кнопку **Полилиния**;
- ввести ломаную линию, точки перелома которой будут принадлежать результирующей полилинии;
- завершить ввод ломаной линии нажатием на правую кнопку мыши.

### *Сплайн*



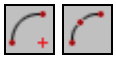
Эта операция аналогична построению полилинии с автоматически установленным видом *Вписанный B-сплайн*. Если выбрать полученный сплайн и назначить для него другие свойства (по аналогии с полилинией), то в результате будут получены те же результаты, что и для полилинии.

### *Окружность*



Окружность может быть построена путем указания курсором точки привязки центра и радиуса или трех точек, лежащих на окружности.

### *Дуга*



Построение дуг может выполняться путем указания курсором точки привязки центра и двух точек начала и конца дуги или по трем точкам на дуге. Изменение параметров дуги выполняется по тем же правилам, что и для окружности (см. раздел **Окружность**).

### *Эллипс*



Для построения эллипса следует указать курсором точку привязки центра и зафиксировать ее нажатием левой кнопки мыши, протянуть нить до точки, определяющей конец одной из осей, и после ее фиксации протянуть вторую нить до точки, определяющей половину длины другой оси эллипса. Если выбрать построенный эллипс, то на чертеже будет показан «рычаг», привязанный к

его центру. Захватив курсором свободный конец рычага, можно развернуть эллипс на нужный угол относительно центра.

Корректировка эллипса выполняется по тем же правилам, что и окружность.

Следует помнить, что эллипс или его часть будут корректно переданы в препроцессор **SCAD** только после применения к ним операции **Расчленить**, в результате выполнения которой кривые, образующие эллипс, будут заменены набором прямолинейных сегментов.

### Прямоугольник



Ввод прямоугольника выполняется путем указания курсором начальной и конечной точек его диагонали.

## Редактирование объектов

### Базовые точки

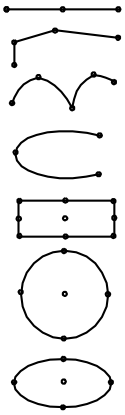


Рис. 34.7-3. *Базовые точки геометрических объектов*

Для всех геометрических объектов предусмотрена система базовых точек (рис. 34.7-3), с помощью которых можно выполнять различные преобразования формы и положения объектов. В зависимости от вида объекта базовые точки расположены следующим образом:

- *линия* — концы и средняя точка;
- *полилиния* — концы сегментов;
- *сплайн* — определяющие точки;
- *дуга* — концы и средняя точка;
- *прямоугольник* — центр, угловые точки и средние точки на сторонах;
- *окружность* и *эллипс* — центр и четыре точки на линии контура.

Для корректировки объекта с помощью базовых точек следует выполнить такие действия:

- выбрать объект;
- подвести курсор к базовой точке и нажать левую кнопку мыши;
- не отпуская мышь, переместить базовую точку в необходимое место.

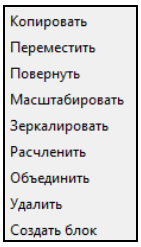



Рис. 34.7-4. *Падающее меню с перечнем функций редактирования*

Если для перемещения объекта используется базовая точка, расположенная в центре линии, окружности, прямоугольника или эллипса, то весь объект перемещается целиком. Кроме базовых точек, у эллипса и прямоугольника предусмотрены «рычаги», с помощью которых можно выполнить поворот объекта. Аналогичные рычаги используются для изменения формы кривой в случае преобразования полилинии в управляемую кривую Безье.

Перечень функций редактирования (рис. 34.7-4) вызывается нажатием на правую кнопку мыши (если объект выбран).

### Копирование



Для копирования объектов необходимо выполнить следующую последовательность действий:

- выбрать объекты для копирования (окончание выбора — нажатие правой кнопки мыши);
- указать базовую точку копирования, т. е. точку, которой объект будет привязан к точке копирования;
- при помощи «нити» переместить объекты в точку копирования;

– нажатием левой кнопки мыши подтвердить копирование (правой — отказаться).

Копирование одного и того же объекта можно произвести последовательно несколько раз, каждый раз подтверждая копирование. Закончить копирование можно нажатием правой кнопки мыши.

### Перемещение



Изменение положения объектов осуществляется путем их перемещения без изменения ориентации и размера. Для выполнения этой операции следует:

– выбрать перемещаемые объекты (окончание выбора — нажатие правой кнопки мыши);
– указать базовую точку перемещения;
– при помощи «нити» переместить объекты;
– нажатием левой кнопки мыши подтвердить операцию (правой — отказаться).

### Зеркальное отражение



Зеркальное отражение производится относительно заданной оси, определяемой двумя точками. После выполнения операции исходные объекты не сохраняются. Для выполнения операции следует:

– выбрать отражаемые объекты (окончание выбора — нажатие правой кнопки мыши);
– указать первую точку оси отражения;
– указать вторую точку;
– нажатием левой клавиши мыши подтвердить отражение (правой — отказаться).

### Поворот



Поворот объектов производится путем задания центра вращения и точки начала вращения. Для выполнения операции следует:

– выбрать поворачиваемые объекты (выбор — нажатие правой клавиши);
– указать точку, соответствующую центру вращения;
– указать точку начала вращения;
– повернуть объекты;
– нажатием левой клавиши мыши подтвердить поворот (правой — отказаться).

### Стирание объектов



Для выполнения этой операции следует выбрать удаляемые объекты и нажать кнопку **Стереть**. Эту же операцию можно осуществить и путем нажатия клавиши **Delete** на клавиатуре.

### Масштабирование



При масштабировании объектов соблюдается равенство масштабных коэффициентов по осям X и Y. Таким образом, при увеличении и уменьшении размеров пропорции объекта сохраняются. Масштабирование выполняется путем указания базового отрезка. Коэффициент масштабирования определяется из отношения длин базового и текущего отрезков.

Масштабирование:

– выбрать масштабируемые объекты;
– указать начальную точку базового отрезка;
– указать конечную точку базового отрезка;
– провести масштабирование путем изменения длины текущего отрезка (уменьшение или увеличение);
– нажатием левой кнопки мыши подтвердить масштабирование (правой — отказаться).

## 34.8. Раздел Обслуживание дерева проектов

В **Дереве проекта** есть отдельный раздел — **Обслуживание**, который содержит следующие позиции:

- **Удаление результатов расчета;**
- **Удаление результатов по формам колебаний.**

При активации операции **Удаление результатов расчета** производится удаление всех файлов, созданных при расчете модели.

Операция **Удаление результатов по формам колебаний** позволяет удалить всю информацию о результатах расчета перемещений/усилий/напряжений/…, вычисленных для отдельных форм колебаний. При этом результаты, относящиеся к суммарным динамическим нагрузкам, удалены не будут. Какие именно результаты следует удалить, выбирает пользователь в диалоговом окне **Удаление результатов расчета** (рис. 34.8-1).

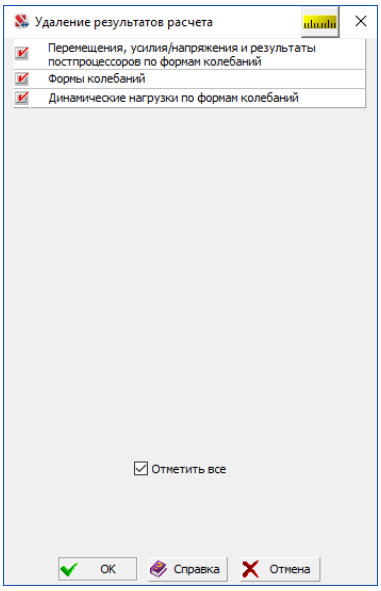



Рис. 34.8-1. *Диалоговое окно* **Удаление результатов расчета**

Данная операция может быть полезна при необходимости освободить место на жестком диске после расчета больших задач.

## 34.9. Редактор акселерограмм



В комплексе **SCAD** предусмотрена возможность расчета зданий и сооружений на сейсмическое воздействие по заданным акселерограммам. Сами акселерограммы должны быть подготовлены в виде файлов определенной структуры, которая описана ниже.

Структура файла достаточно проста, и ее можно подготовить в любом текстовом редакторе. Чтобы упростить процесс подготовки акселерограмм, в систему **SCAD Office** включена специальная программа **Редактор Акселерограмм**.

## Главное окно

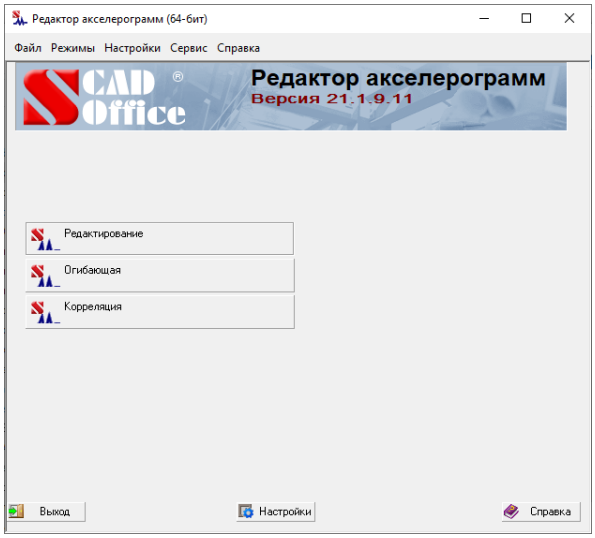



Рис. 34.9-1. **Редактор Акселерограмм**

Помимо стандартных функций по редактированию данных эта программа позволяет также выполнить анализ акселерограмм. В частности, в графической и табличной формах можно получить следующую информацию:

- акселерограмму (зависимость ускорение-время);
- велосиграмму (зависимость скорость-время);
- сейсмограмму (зависимость перемещение-время);
- амплитудный спектр Фурье (зависимость модуля преобразования Фурье[1] акселерограммы от частоты);
- спектр мощности (зависимость квадрата модуля преобразования Фурье акселерограммы от частоты);
- спектры (и псевдоспектры) ответа при заданных значениях логарифмических декрементов колебаний[2];
- спектральная плотность;
- общие параметры (максимальные и среднеквадратичные значения ускорения, скорости и перемещения, ...).

Независимо от того, является акселерограмма инструментальной (получена при помощи сейсмографа) или расчетной (вычисленной на основании измеренной сейсмограммы), она, как правило, содержит ошибки. Для расчетных акселерограмм они возникают при численном дифференцировании и, чаще всего, эти ошибки велики для высокочастотной компоненты воздействия. Для инструментальных акселерограмм ошибки возникают при их записи и оцифровке. При этом большинство записанных акселерограмм содержат большие ошибки в длиннопериодической области

Типичной ошибкой акселерограммы является смещение и поворот нулевой линии (см., например, [2]). Приведем пример, заимствованный из книги [4], который показывает, что даже небольшие ошибки такого рода могут полностью исказить картину перемещений рассчитываемого объекта. Пусть задано гармоническое воздействие $\ddot{x}(t) = w\sin(\omega t)$ с малым искажением в виде поворота нулевой линии $0,001wt$ и смещения этой линии на величину $-0,03w$. Указанные искажения практически не заметны на акселерограмме $\ddot{x}(t)$, однако они полностью искажают сейсмограмму, уравнение которой принимает вид $x(t) = w(0,001\frac{t^2}{2} - 0,03t - \frac{1}{\omega^2}\sin\omega t)$. Для

[1] В программе используется следующий вид преобразования Фурье: $\int f(t)e^{2\pi it\omega}dt$.

[2] Определения и обсуждение см. в книгах [1], [4].

корректировки ошибок подобного типа в программе предусмотрена возможность балансировки акселерограмм.

Кроме того, в программе предусмотрены возможности корректировки основной линии и частотной фильтрации.

Файлы акселлерограмм имеют расширение **.spc** и являются обычными текстовыми файлами. В начале каждого файла содержится произвольный текст (комментарий), далее символ-разделитель #, после которого следуют три числа (коэффициент перевода используемых единиц в м/сек$^2$, количество точек акселерограммы и шаг по времени в секундах). Предполагается, что записи ускорений произведены с одинаковым интервалом. После этих данных должны быть записаны величины ускорений. Количество величин ускорений должно соответствовать числу точек. Величины ускорений, шаг по времени и коэффициент перевода — это числа с плавающей точкой, в которых целая часть отделяется от дробной части точкой. Все числа в файле должны быть разделены пробелами или записаны с новой строки. Пример такого файла можно найти в главе 8.

## Параметры настройки

Программа включает набор операций настройки, общий для всех программ, входящих в состав системы **SCAD Office**. В связи с этим ниже приводится описание операций, характерных только для **Редактора акселерограмм**.

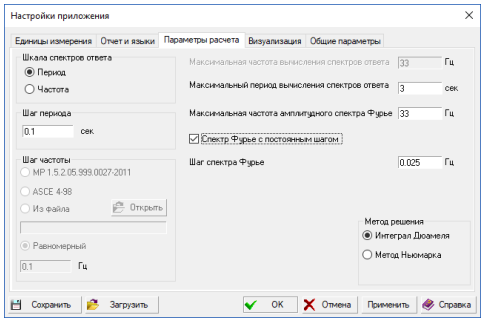



Рис. 34.9-2. *Страница* **Параметры расчета**

Страница **Параметры расчета** (рис. 34.9-2) дает возможность выбрать максимальное значение частоты, до которой будут вычислены спектры Фурье и максимальный период (или максимальную частоту) для вычисления спектров ответа, шаг по времени для вычисления спектров ответа в зависимости от периода, выбрать метод решения (интегралы Дюамеля или метод Ньюмарка). Если будет задано очень большое значение максимальной частоты спектра Фурье, то при расчете программа автоматически ограничит его величиной частоты Найквиста, равной $1/(2\Delta)$, где $\Delta$ — шаг акселерограммы по времени. По умолчанию амплитудный спектр Фурье и спектр мощности вычисляются и визуализируются при частотах $k/\Delta$ ($k$=1,2...), но опция *Спектр Фурье с постоянным шагом* позволяет получить графики с заданным пользователем шагом по частоте.

Пользователь имеет возможность выбрать тип шкалы спектров ответа (период-ускорение или частота-ускорение). Для случая, когда строится зависимость частота-ускорение, пользователь может выбрать набор приращений частот (по рекомендациям МР 1.5.2.05.999.0027-2011 или ASCE 4-98). Кроме того, пользователь может подготовить текстовый файл (с расширением **.txt**) со списком частот, для которых следует выводить значения спектров ответа. Загрузить файл можно, если выбрана опция **Из файла** и нажата кнопка **Открыть**. В файле должны быть записаны значения соответствующих частот (в Гц).

Если при вычислении спектров ответа оказывается, что вычисленная частота превышает максимально заданную в файле, то список частот дополняется на основании последнего заданного пользователем приращения (разности последних двух чисел). Частоты в файле должны быть заданы в виде чисел с плавающей запятой, в которых целая часть отделяется от дробной части точкой. Все числа в файле должны быть разделены пробелами или записаны с новой строки. Предусмотрена также возможность использования равномерной шкалы с шагом, задаваемым на данной странице.

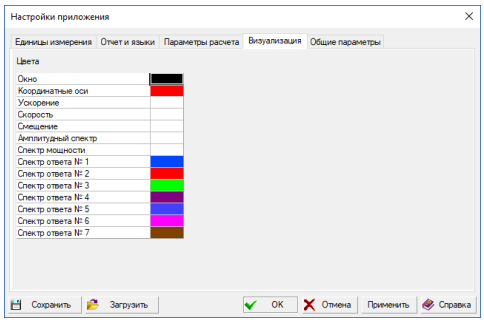



Рис. 34.9-3. *Страница* **Визуализация**

На странице **Визуализация** (рис. 34.9-3) назначается цвет фона для окна с изображением графиков (строка **Окно**), а также цвета координатных осей и цвета графиков. Для изменения цвета следует установить курсор в строку с наименованием вида информации и двойным щелчком левой кнопки мыши активировать стандартное окно Windows для настройки цвета.

Настройки программы можно сохранить во внешнем файле, используя кнопку **Сохранить**, и в дальнейшем загрузить этот файл (кнопка **Загрузить**).

## Корректировка акселерограммы

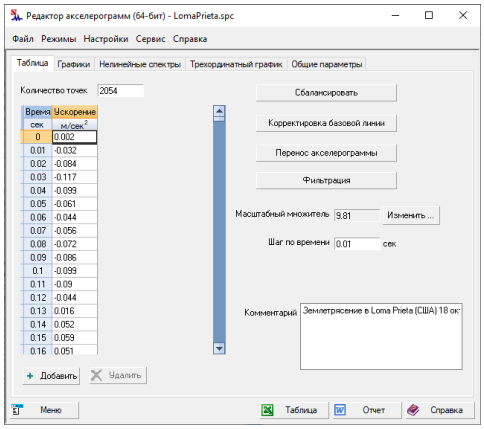



Рис. 34.9-4. *Страница* **Таблица**

Загрузка акселерограммы выполняется из пункта **Открыть** меню ***Файл***. Выбор файла выполняется в стандартном окне среды Windows **Открыть**. При этом в списке файлов будут присутствовать только файлы с расширением **.spc**. После загрузки данные акселерограммы (время и ускорение) попадают в таблицу (рис. 34.9-4). В полях **Количество точек**, **Масштабный множитель**, **Шаг по времени** и **Комментарий** отображаются данные, приведенные в заголовке файла с акселерограммой.

В режиме **Корректировка** акселерограмм возможен также импорт файлов различных форматов с акселерограммами (меню ***Файл|Импорт***). При использовании импорта выбор файла выполняется в стандартном окне среды Windows **Открыть**. После этого появляется диалоговое окно, в котором можно выбрать опции специфичные для того или иного формата (наличие нескольких ускорений в одной строке, номер колонки со временем, номер колонки с ускорением, номер первой строки с информацией об ускорениях, ...).

Корректировка акселерограммы включает изменение значений ускорений, ввод новых строк, удаление строк, а также балансировку, удаление тренда и фильтрацию. Первые три операции выполняются в таблице. Для ввода и удаления строк используются соответствующие кнопки.

Ввод новой строки выполняется перед отмеченной строкой. Если строка не выбрана, то новая строка добавляется в конец таблицы. При удалении из таблицы удаляются все отмеченные строки. Значение в поле **Количество точек** изменяется автоматически.

Кнопка **Изменить** активирует диалоговое окно, в котором можно ввести коэффициент масштабирования акселлерограммы. Например, имея акселерограмму, замеренную для семибального землетрясения, можно, введя коэффициент 2,0, получить акселерограмму, которая соответствует восьмибальному землетрясению.

Нажатие кнопки **Сбалансировать** позволяет произвести балансировку акселерограммы.

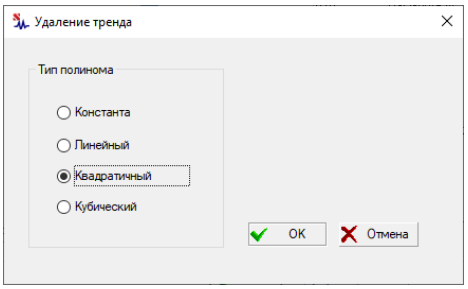



Рис. 34.9-5. *Диалоговое окно* **Удаление тренда**

Кнопка **Удаление тренда** вызывает диалоговое окно (рис. 34.9-5), в котором пользователь может выбрать алгоритм, который будет использоваться для удаления тренда (балансировки основной линии) акселерограммы. Предусмотрена возможность использования константы или полиномов до третьего порядка включительно.

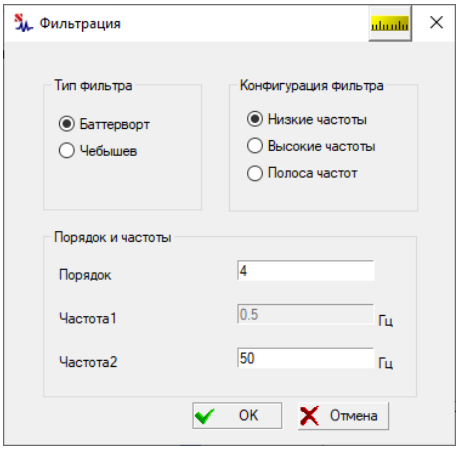



Рис. 34.9-6. *Диалоговое окно* **Фильтрация**

Операция частотной фильтрации активируется нажатием кнопки **Фильтрация**. В диалоговом окне (рис. 34.9-6) следует выбрать тип фильтра (Баттерворта или Чебышева), его конфигурацию (фильтр нижних частот, фильтр верхних частот или полосовая фильтрация). Кроме того, здесь задается порядок фильтра и частота отсечения (в случае полосовой фильтрации — две частоты).

После нажатия кнопки **ОК** будет выполнена частотная фильтрация сигнала.

Пересчет стандартной акселерограммы на некий уровень, отличный от уровня замеров, реализуется программой при нажатии кнопки **Перенос акселерограммы**. При этом появляется диалоговое окно (см. рис. 34.9-7), в котором необходимо задать информацию о многослойном однородном в плане грунтовом основании и глубине, на которой следует вычислить новые значения ускорений. Предполагается, что нижний уровень последнего слоя грунта представляет собой границу скального основания.

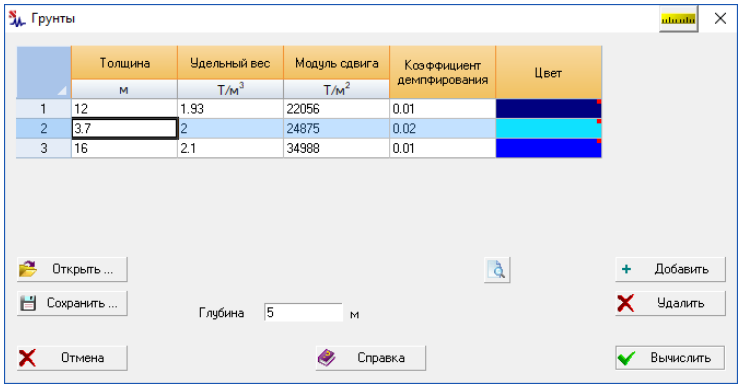



Рис. 34.9-7. *Диалоговое окно* **Грунты**

Расчет производится с учетом следующих предположений[1]:

- грунтовой массив является многослойным и однородным в плане;

[1] Методика расчета, которая использована в программе, описана в статье P.Schnabel, H.Bolton Seed, J.Lysmer, *Modification of seismograph records for effects of local soil conditions*, Bulletin of the Seismological Society of America, 1972, **62**, No. 6, (6): 1649–1664.

- каждый слой грунта полностью описывается значениями удельного веса, модуля сдвига и коэффициента демпфирования (эти значения предполагаются независимыми от частоты колебаний);
- отклик системы вызывается направленным вверх распространением сдвиговой волны от нижележащего скального основания;
- зависимость напряжений от модуля сдвига и коэффициента демпфирования имеет характер линейной зависимости.

## Построение графиков

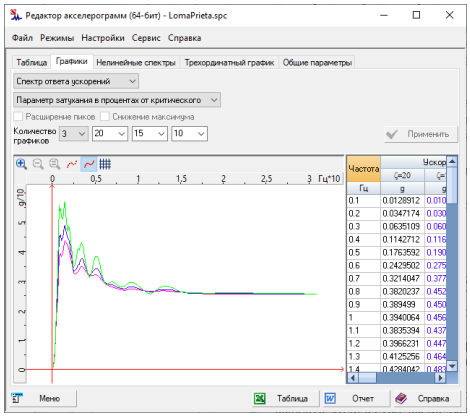



Рис. 34.9-8. *Страница* **Графики**

Графики акселерограмм, велосиграмм и других факторов отображаются на странице **Графики** (рис. 34.9-8). Вид графика выбирается из выпадающего списка в верхней части страницы. В случае если акселерограмма не сбалансирована, выводится предупреждение. Справа от графика помещается таблица со значениями анализируемого фактора.

При построении графиков спектров ответа можно выбрать количество вычисляемых спектров (до 7) и для каждого указать «свой» логарифмический декремент колебаний. Декременты для каждого графика можно задать явно в поле ввода выпадающего списка или выбрать из списка стандартных значений, рекомендуемых Госатомнадзором России [4] и МАГАТЭ [5]. Если вводятся значения, отличные от указанных в списках, то для отображения графика следует нажать кнопку **Применить**.

Графики выводятся разными цветами. Эти же цвета используются для отображения соответствующих значений в таблице. Если на экране производится визуализация только одного графика спектра ответа, программа позволяет произвести процедуры расширения пиков и снижения максимумов (см. [1, глава 7]). В случае одного графика кнопка **Сохранить** позволяет сохранить спектр ответа в файл с расширением .**spd** и использовать этот файл в качестве графика коэффициента динамичности при расчетах на сейсмическое воздействие (при сохранении **spd**-файла производится нормировка спектра ответа на величину максимального ускорения акселерограммы).

Программа позволяет так же задавать информацию о затухании колебаний, задавая один из перечисленных ниже параметров:

- коэффициент поглощения энергии;
- параметр затухания (в долях от критического или в процентах);
- логарифмический декремент колебаний;
- коэффициент потерь;
- коэффициент внутреннего трения (неупругого сопротивления).

Выбор способа ввода данных о внутренних потерях производится с помощью соответствующего пункта в выпадающем списке.

Если установить курсор в поле графика, то рядом с курсором появится информационное поле со значениями факторов в точке указания курсором, что позволяет динамически исследовать график.

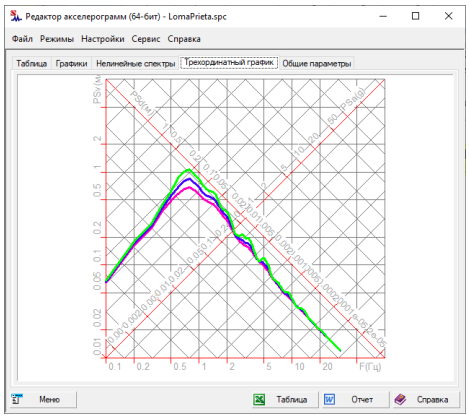



Рис. 34.9-9. *Страница* **Трехординатный спектр**

На странице **Трехординатный спектр** (рис. 34.9-9) приводится также трехординатный график псевдоспектров.

## Нелинейные спектры

На отдельной странице программа предоставляет возможность построения нелинейных спектров ответа (ускорений, скоростей и смещений). Данная страница аналогична странице **Графики**. Отличия состоят в том, что задается параметр затухания, количество вычисляемых спектров (до 7) и для каждого указывается «свой» параметр пластичности μ. Нелинейные спектры вычисляются в предположении идеальной пластичности материала. Программа автоматически добавляет график линейного спектра ответа (который соответствует μ=1).

## Общие параметры

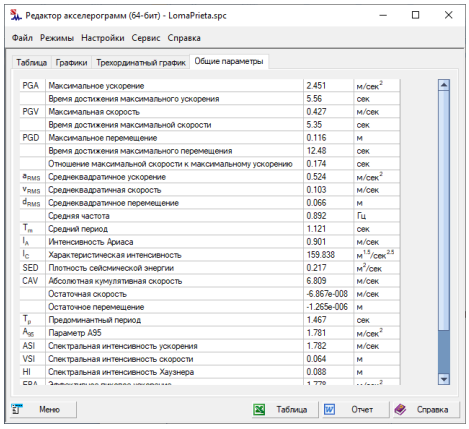



Рис. 34.9-10. *Страница* **Общие параметры**

На этой странице (рис. 34.9-10) выводятся общие параметры акселерограммы.

Поскольку в различных книгах и статьях используются различные определения тех или иных параметров, ниже приведен список и определения вычисляемых характеристик. При этом используются следующие обозначения

$g$ — ускорение силы тяжести;

$a(t)$ — ускорение в момент времени $t$;

$T$ — общая продолжительность акселерограммы;

$v(t)$ — скорость в момент времени $t$;

$S_a(\xi,t)$ — спектр ответа ускорений в момент времени $t$ при параметре затухания (в долях от критического) равным $\xi$;

$S_v(\xi,t)$ — спектр ответа скоростей в момент времени $t$ при параметре затухания (в долях от критического) равным $\xi$;

$PS_a(\xi,t)$ — псевдоспектр ответа ускорений в момент времени $t$ при параметре затухания (в долях от критического) равным $\xi$;

$PS_v(\xi,t)$ — псевдоспектр ответа скоростей в момент времени $t$ при параметре затухания (в долях от критического) равным $\xi$.

| Обозначение | Наименование | Замечания |
|---|---|---|
| **PGA** | Максимальное ускорение | |
| **PGV** | Максимальная скорость | |
| **PGD** | Максимальное перемещение | |
| | Отношение максимальной скорости к максимальному ускорению | |
| $\boldsymbol{a_{RMS}}$ | Среднеквадратичное ускорение | |
| $\boldsymbol{v_{RMS}}$ | Среднеквадратичная скорость | |
| $\boldsymbol{d_{RMS}}$ | Среднеквадратичное перемещение | |
| | Средняя частота | |
| $T_m$ | Средний период | |
| $T_p$ | Предоминантный период | Период, соответствующий максимальному значению амплитудного спектра Фурье |
| $I_A$ | Интенсивность Ариаса | $\frac{\pi}{2g}\int_0^T a(t)^2 dt$ |
| $I_c$ | Характеристическая интенсивность | $(a_{RMS})^{\frac{3}{2}}\sqrt{T}$ |
| SED | Плотность сейсмической энергии | $\int_0^T v(t)^2 dt$ |
| CAV | Абсолютная кумулятивная скорость | $\int_0^T \lvert a(t)\rvert dt$ |
| $A_{95}$ | Параметр A95 | Уровень ускорений ниже которого содержится 95% интенсивности Ариаса |
| ASI | Спектральная интенсивность ускорения | $\int_{0.1\,сек}^{0.5\,сек} S_a(\xi=0.05,t)dt$ |
| VSI | Спектральная интенсивность скорости | $\int_{0.1\,сек}^{0.5\,сек} S_v(\xi=0.05,t)dt$ |
| HI | Спектральная интенсивность Хаузнера | $\int_{0.1\,сек}^{0.5\,сек} PS_v(\xi=0.05,t)dt$ |
| EPA | Эффективное пиковое ускорение | $\frac{1}{2.5}\underset{[0.1сек;0.5\ сек]}{mean} S_a(\xi=0.05)$ |
| K | Коэффициент гармоничности | $K=PGA*PVD/PGV^2$ |

## Огибающие

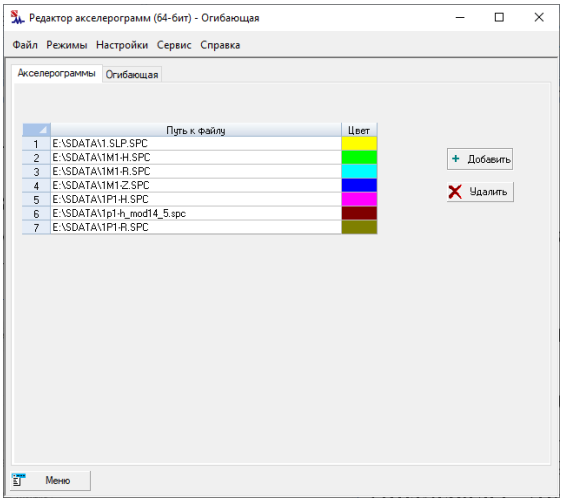



Рис. 34.9-11. *Страница* **Акселерограммы**

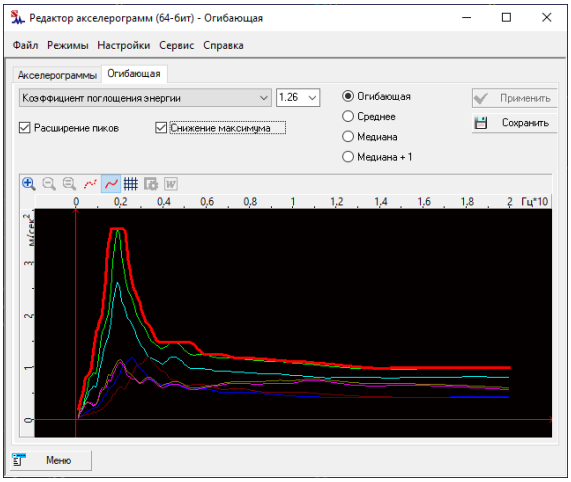



Рис 34.9-12. *Страница* **Огибающая**

Режим предназначен для построения спектра, соответствующего пакету акселерограмм. На первой странице **Акселерограммы** (рис. 34.9-11) с помощью кнопки **Добавить** можно создать список акселерограмм, которые подлежат анализу. При нажатии этой кнопки появляется стандартное окно **Открыть**, с помощью которого можно выбрать один или несколько файлов с акселерограммами. Если какой-то файл выбран по ошибке, то выбрав его в таблице, можно с помощью кнопки **Удалить** убрать его из списка. Набор выбранных файлов отображается в таблице. В первой колонке таблицы приводится путь к файлу, а во второй – цвет, который будет использован при отрисовке соответствующего спектра ответа ускорений. Двойной щелчок мыши на ячейку во второй колонке позволяет вызвать диалоговое окно для настройки цвета.

После того, как нужный пакет акселерограмм сформирован, на второй странице **Огибающая** (рис. 34.9-12) можно задать данные о демпфировании и получить огибающую спектров. Помимо огибающей программа позволяет построить средний спектр, медианный спектр или так называемый спектр *медиана+1* (медиана + стандартное отклонение). Выбор нужного типа осуществляется из набора радио-кнопок на данной странице. Независимо от выбранного типа для результирующего спектра доступны операции (выполняемые при взведении соответствующих маркеров) расширения пиков и снижения максимумов. Кнопка **Сохранить** выполняет такую же функцию, как и в режиме **Редактирование** — создание файла графика динамичности.

Отметим, что в Eurocode содержится рекомендация использовать огибающий спектр в том случае, когда число акселерограмм в пакете не меньше трех. Использование среднего спектра Eurocode рекомендует при числе акселерограмм в пакете не меньше семи. Использование медианного спектра оговорено в американских документах по сейсмическому проектированию зданий и сооружений АЭС (см. ASCE/SEI 4-16).

## Корреляция

При использовании трехкомпонентных акселерограмм а также в других случаях, когда для расчета используется несколько акселерограмм, нормы проектирования (например, РБ-006-98) требуют обеспечения статистической независимости акселерограмм. В частности, согласно РБ-006-98, абсолютное значение коэффициентов корреляции не должно превышать 0,3. ASCE4-16 содержит дополнительное требование о том, что средний коэффициент корреляции по всему набору не должен превышать 0.16.

Данный режим предназначен для анализа взаимных корреляций пакета акселерограмм. Набор акселерограмм формируется на странице **Акселерограммы**, которая идентична соответствующей странице режима **Огибающая**.

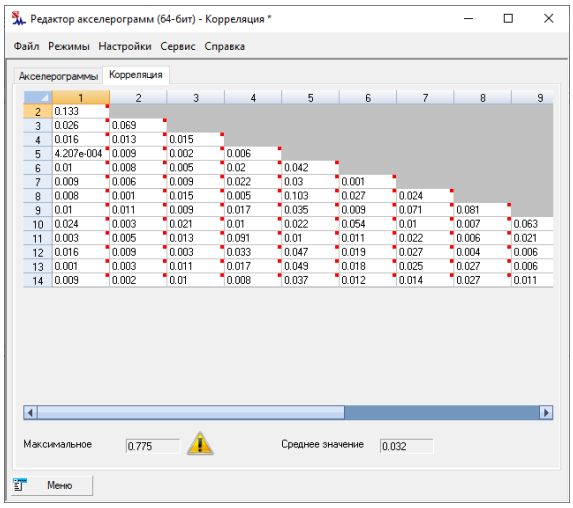



Рис 34.9-13. *Страница* **Корреляция**

После того, как нужный пакет акселерограмм сформирован, на второй странице **Корреляция** (см. рис. 34.9-13) будет получена матрица с коэффициентами взаимных корреляций всех пар акселлерограмм, входящих в созданный пакет (ввиду симметричности приводится только нижний треугольник матрицы). Кроме того, вычисляются максимальный и средний коэффициенты корреляции по всему набору.

## Синтез акселерограмм

Сейсмические волны от сильных землетрясений воздействуют на здания и сооружения сложным образом. Механический отклик сооружения зависит от частотного состава приходящей волны, реакции грунта, на котором находится сооружение, технических особенностей конструкций сооружения, находящегося на грунте. Полную информацию о напряженно-деформированном состоянии конструкций или отдельных их элементов под воздействием сейсмических колебаний может дать динамический расчет с определением реакции сооружения во временной области. В связи с этим в практике сейсмостойкого строительства, особенно ответственных и экологически опасных объектов, для расчета сейсмических нагрузок применяется динамический метод с использованием реальных или синтезированных акселерограмм сильных движений грунта (см., например, EN 1998 или ДБН В 1.1-12:2014 ).

Идеальным решением для учета возможных нелинейных эффектов при сейсмических нагрузках прямым динамическим расчетом является использование инструментальных записей ускорений грунта при прогнозируемых максимальных землетрясениях. Однако получить такие записи в большинстве случаев невозможно и приходится использовать синтезированные акселерограммы. С их помощью решаются как линейные, так и нелинейные динамические задачи. При этом нормы требуют, чтобы применялись пакеты акселерограмм, в частности, для построения некоторой огибающей, которая может сыграть роль спектра в линейно-спектральном варианте анализа.

При активации данного режима появляется многостраничное диалоговое окно (рис. 34.9-14).

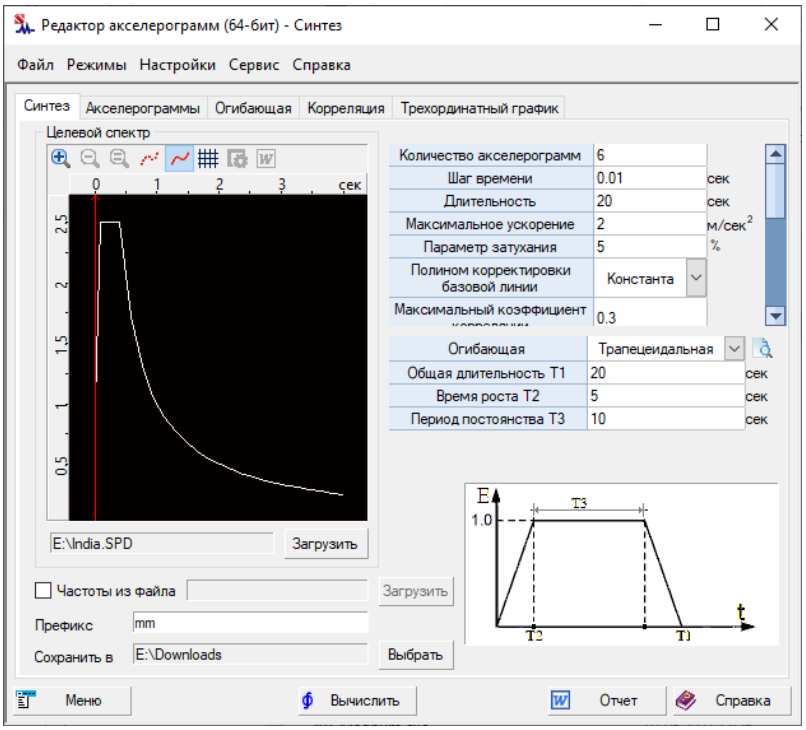



Рис. 34.9-14. *Страница* **Синтез**

На первой странице **Синтез** следует задать следующую информацию:

- с помощью кнопки **Загрузить** выбрать spd-файл с описанием целевого спектра. Файл может быть создан программой **Редактор графика динамичности** (описание формата этого текстового файла содержится в документации к данной программе). После загрузки файла форма целевого спектра отображается в диалоговом окне;
- при синтезе акселерограмм будет использован набор частот, который установлен в настройках программы. Если взведен маркер **Частоты из файла**, то соответствующая кнопка **Загрузить** позволяет выбрать файл с нужным набором частот. Использование набора частот наиболее опасных для сооружения может быть полезно при типовом проектировании, когда площадка строительства заранее неизвестна [3];
- кнопка **Выбрать** предназначена для выбора директории, в которую будут сохранены файлы синтезированных акселерограмм;
- имена файлов будут иметь префикс, заданный пользователем.

В отдельной таблице задается:

- необходимое количество акселерограмм;
- шаг по времени;
- длительность процесса;
- максимальное ускорение синтезируемых акселерограмм;
- параметр затухания в процентах от критического;
- полином корректировки базовой линии (константа, линейный, квадратичный или кубический);
- максимальный коэффициент корреляции;
- максимальное количество итераций;
- минимальная и максимальная частота учета ошибки спектра.

Форма огибающей задается в отдельной таблице, в которой следует выбрать форму огибающей (стационарная, трапециадальная, экспоненциальная или составная). Для каждой формы огибающей задаются соответствующие параметры. После задания этих параметров по кнопке  доступен предварительный просмотр формы огибающей.

По кнопке **Вычислить** программа производит синтез заданного количества акселерограмм, файлы которых сохраняются в выбранной пользователем директории и имеют имена типа <префикс><номер>.spc.

Если задача вычисления спектра отклика по акселерограмме является однозначной, то обратная к ней неоднозначна, поскольку одному и тому же спектру с определенной степенью точности могут соответствовать разные акселерограммы. Более того, эта задача не всегда допускает решение. Если решение удается найти, то оно является приближенным и ищется с использованием итерационного алгоритма. Чтобы избежать длительного (или даже бесконечного) времени счета максимальное количество итераций ограничивается пользователем (по умолчанию это количество равно 30).

После выполнения расчета становятся доступны страницы **Акселерограммы**, **Огибающая**, **Корреляция**, **Трехординатный** график. Эти страницы работают аналогично одноименным страницам в режимах **Огибающие**, **Корреляция**, **Редактирование**, которые описаны ранее.

При синтезе пакета акселерограмм программа проверяет, что выполнены следующие условия, которые рекомендуются нормами проектирования (см., например, п. 2.4 ASCE/SEI 43-05):

- шаг по времени, который должен быть не более 0.01 сек, чтобы обеспечить частоту Найквиста 50 Гц;
- записи акселерограмм должны иметь общую продолжительность по времени по меньшей мере равной 20 сек;
- ни одна точка спектра (полученного из акселерограмм) не должна быть более чем на 10% ниже значения целевого спектра (сопоставление производится для выбранного набора частот);
- среднее отношение значения спектра, вычисленного по акселерограмме, к значению ускорения в целевом спектре, вычисленное для частот в диапазоне от заданной минимальной до заданной максимальной частоты учета ошибки спектра, превышает единицу;
- для любых двух синтезированных акселерограмм коэффициент корреляции не превышает заданного значения (по умолчанию 0.3).

Акселерограммы синтезируется на основании реализации стационарного случайного процесса, параметры которого подбираются так, чтобы спектр ответа ускорений реализации соответствовал целевому спектру. Затем получившаяся функция во временном диапазоне умножается на заданную огибающую функцию.

## 34.10. Редактор графика коэффициентов динамичности



При расчете на сейсмические воздействия с использованием линейно-спектральной теории, которая предлагается большинством нормативных документов по проектированию (например, СНиП II-07-81, ПН АЭ Г-5-006-87 или НП-031-01), используется регламентируемый этими нормами график значений коэффициентов динамичности $\beta$.

Появление новых нормативных документов, таких как нормы Республики Казахстан или нормы Грузии, вызывает необходимость использовать специфические зависимости коэффициентов динамичности от периода собственных колебаний $\beta(t)$. Аналогичные проблемы возникают при учете региональных особенностей сейсмической обстановки, поскольку здесь для построения графиков $\beta(t)$ могут использоваться акселерограммы землетрясений, характерных для рассматриваемого региона (например, длиннопериодные землетрясения в Румынии).

В связи с изложенным выше, в комплекс **SCAD** включен редактор графика коэффициентов динамичности, который позволяет задать любой график $\beta(t)$.

Файлы графиков коэффициентов динамичности имеют расширение **.spd** и являются обычными текстовыми файлами. В начале каждого файла содержится произвольный текст (комментарий), далее символ-разделить — #, после которого следуют пары чисел — период и коэффициент. Величины коэффициентов и периодов — это числа с плавающей точкой, в которых целая часть отделяется от дробной точкой. Все числа в файле должны быть разделены пробелами или записаны с новой строки. Пример такого файла можно найти в главе 8.

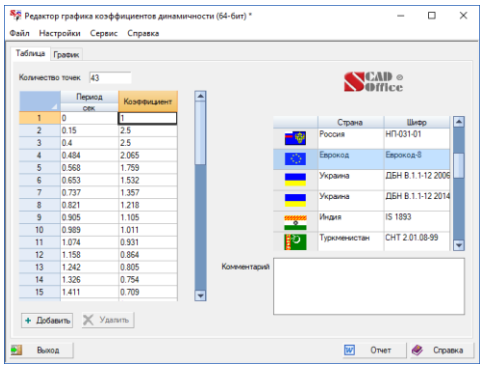


Рис. 0-1. *Страница* **Таблица**

График коэффициентов динамичности может быть построен автоматически в соответствии с рекомендациями, приведенными в СНиП II-7-81* «Строительство в сейсмических районах», ПН-031-01 «Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций» или других норм проектирования. Нормы выбираются кнопками, расположенными на странице **Таблица** (рис. 0-1) окна **Редактор графиков динамичности**. Данные, необходимые для построения графиков, задаются в окне **Параметры** (рис. 0-2), и зависят от выбранных норм.

При необходимости график можно изменить путем корректировки данных в таблице, в том числе и путем включения новых и удаления существующих строк (кнопки **Добавить** и **Удалить**). Полученный график отображается на одноименной странице (рис. 0-3). Вместе с графиком можно сохранить и комментарий к нему. Комментарий вводится в одноименном поле на странице **Таблица**.

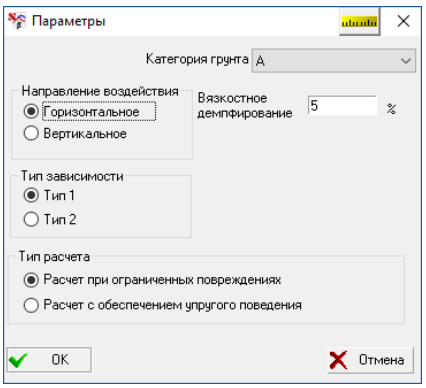


Рис. 0-2. *Окно* **Параметры** (Eurocode 8)

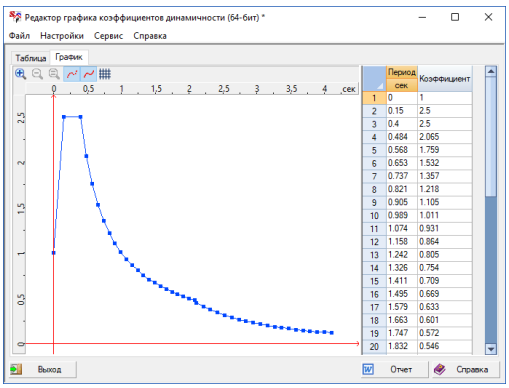


Рис. 0-3. *Страница* **График**

Если график коэффициентов динамичности строится по правилам, отличным от рекомендованных указанными нормами, то его можно задать путем ввода данных в таблице. В этом случае для ввода строк используется кнопка **Добавить**.

Данные в таблице должны быть упорядочены по возрастанию периодов. При этом не должно быть точек с одинаковыми значениями периода.

Если график создавался другими средствами, например, в текстовом редакторе, то обязательным является использование точки в качестве разделителя целой и дробной части. Период должен задаваться в секундах.

## 34.11. Программа Кокон – электронный справочник

Программа представляет собой электронный справочник для определения коэффициентов концентрации напряжений.

Рассмотрены следующие источники концентрации напряжений:

- вырезы и выточки;
- галтели;
- круглые отверстия;

- некруглые отверстия.

Кроме того, в программе предусмотрена возможность вычисления коэффициентов интенсивности напряжений для различных случаев напряженно-деформированного состояния при наличии трещин.

## 34.12. Программа Куст - электронный расчетно-теоретический справочник проектировщика

Программа-справочник **Куст** предназначена для решения определенного класса задач механики, для которых в литературе приведены аналитические или достаточно точные приближенные решения. Несмотря на то, что большинство этих задач могут быть решены с помощью программы **SCAD**, использование программы **Куст** позволяет получить решение без построения расчетных схем. Кроме того, часть результатов может быть использована для задания данных при построении конечно-элементных моделей (например, коэффициенты расчетной длины, оценки собственных частот и т. п.).

Все решаемые программой задачи объединены в следующие группы:

- устойчивость равновесия;
- частоты собственных колебаний;
- другие задачи о колебаниях;
- статические расчеты;
- вспомогательные вычисления.

## 34.13. Литература к главе Сервисные функции

1. Бирбраер А.Н., Расчет конструкций на сейсмостойкость. Санкт-Петербург. — Наука. — 1998г. — 255 С.
2. Мишин Д.И., Корректирование акселерограмм при моделировании сейсмических воздействий. Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. — 2001г.— № 2. — с. 17-22.
3. А.М. Уздин, О.П. Нестерова, С.В. Прокопович, А.А. Долгая, Чанг Юань, Гуань Юхай, Ван Хайбинь, *Моделирование сейсмических воздействий для динамического расчета зданий и сооружений* // Российско- китайский научный журнал «Содружество». - 2017. - № 20. - С. 59-66.
4. Уздин А.М., Сандович Т.А., Аль-Насер-Мохомад Самих Амин. Основы теории сейсмостойкости и сейсмостойкого строительства зданий и сооружений. Санкт-Петербург — Изд-во ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. — 1993г. — 176 С.
5. Safety Series No 50-SG-S1 (Rev. 1). *Earthquake and associated topics in relation to nuclear power plant siting. A safety guide*. International Atomic Energy Agency. —Vienna. — 1991.

# 35. Настройки программы

Многие параметры, которые использует программа, могут быть изменены пользователем. Некоторые такие настройки уже были описаны выше, например, цветовые схемы (см. раздел 10.5), настройки графической среды (см. раздел 10.4), параметры расчета (см. главу 11), настройка списка шагов арматуры (см. раздел 19.11). Ниже описана настройка опций, которые уже упоминались выше, но не были подробно описаны.

Настройка всех этих параметров вызывается из соответствующих пунктов меню ***Настройка***.

**Большинство параметров расчета сохраняются в файле проекта (например, spr-файле). Если же окно настройки параметров активировано из меню *Настройки* в тот момент, когда нет открытых моделей, то сохраненные величины будут использованы для всех вновь создаваемых проектов.**
**В этом режиме (отсутствия открытых моделей) в меню *Настройки* доступны пункты меню *Экспорт настроек ...* и *Импорт настроек…*, позволяющие соответственно сохранить настройки во внешнем файле и загрузить данные из файла.**

Для использования в проектах, созданных ранее, настроек графической среды, заданных для новых проектов, следует после загрузки такого проекта активировать в меню **Настройки** раздел **Применить актуальные настройки графической среды, принятые для новых проектов**. В этом случае все, сделанные ранее, назначения параметров будут заменены на актуальные настройки. Учитывая, что настройки конкретного проекта сохраняются в самом проекте, все последующие изменения значений параметров будут актуальны только для проекта, в котором они вносились.
В число актуальных настроек в меню **Настройки** входят:

- все параметры в разделе **Настройки цветовой схемы**;
- все параметры раздела **Настройка параметров среды**;
- настройка вида, цвета и размера шрифтов в разделе **Настройки**.

## 35.1. Единицы измерений

Программа оперирует с многочисленными физическими величинами, имеющими различные размерности. Для каждой из них можно настроить единицы измерений, которые будут использоваться при вводе и/или отображении. Для этого используется многостраничное диалоговое окно **Параметры**, которое активируется кнопкой инструментальной панели  или из меню ***Настройки***. Единицы измерения для исходных данных и результатов настраиваются на двух разных страницах **Единицы измерения** и **Единицы измерения результатов**, которые имеют сходную структуру (рис. 0-1)

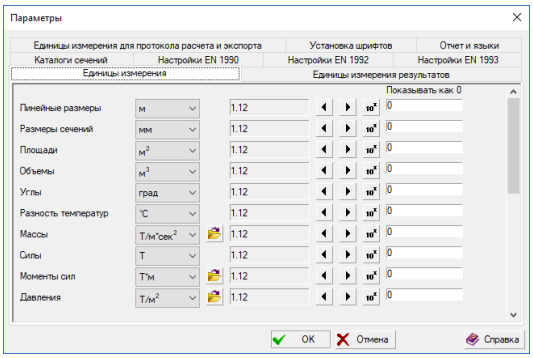



Рис. 0-1. *Страница* **Единицы измерения** *диалогового окна* **Параметры**

Страница **Единицы измерения** определяет используемые единицы измерения величин. Она включает две группы данных. В первой задаются единицы измерения, применяемые для определения размеров конструкции, сил, моментов и т. д.

Для составных единиц (таких, как моменты сил, напряжение и т. д.) предусмотрена возможность раздельного выбора единиц измерения составляющих (например, единиц измерения сил и единиц измерения плеча для моментов). Для этого используется кнопка  .

Вторая группа позволяет регулировать форму представления и точность задания данных. Специальные элементы управления используются для назначения форматов представления данных. Здесь задается количество значащих цифр при представлении данных в форме с десятичной точкой или в экспоненциальном представлении.

Точность представления данных (количество значащих цифр после запятой) назначается с помощью кнопок  (уменьшить) и  (увеличить), а установка экспоненциальной формы числа — маркером  . Кроме того, в полях ввода **Показывать как 0** можно определить, какое значение той или иной единицы измерения следует интерпретировать как «очень малое» и при визуализации соответствующих данных показывать как 0, если значение по абсолютной величине меньше заданного.

Кроме того в диалоге есть страница, на которой можно установить единицы измерения, которые будут использоваться при выводе сообщений в протокол расчета (например, для суммарных нагрузок) и при экспорте данных.

## 35.2. Экспресс-настройка единиц измерений

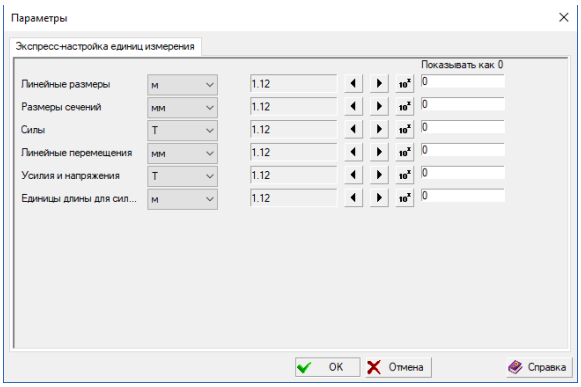



Рис. 35.2-1. *Страница* **Экспресс-настройка единиц измерения** *диалогового окна* **Параметры**

В тех случаях, когда нужно "быстро" сменить единицы измерений, установив их, например, для всех величин, имеющих отношение к силовым факторам (усилия, моменты сил, напряжения, ...) можно использовать экспресс-настройку единиц измерения, которая вызывается из меню ***Настройки***. Диалоговое окно, которое используется для этих целей (рис. 35.2-1), аналогично диалоговому окну настройки единиц измерений (рис. 0-1). Разница состоит в том, что выбрав, например, для сил единицу измерения Н, мы получим для моментов сил Н×м, для давления – Н/м$^2$ и т. п.

## 35.3. Установка шрифтов

Вид, размер, стиль и цвет шрифта цифровой информации на расчетной схеме назначаются на странице **Установка шрифтов** (рис. 35.3-1) диалогового окна **Параметры**, которое вызывается из пункта **Настройки** раздела меню ***Настройки*** (или кнопкой  инструментальной панели).

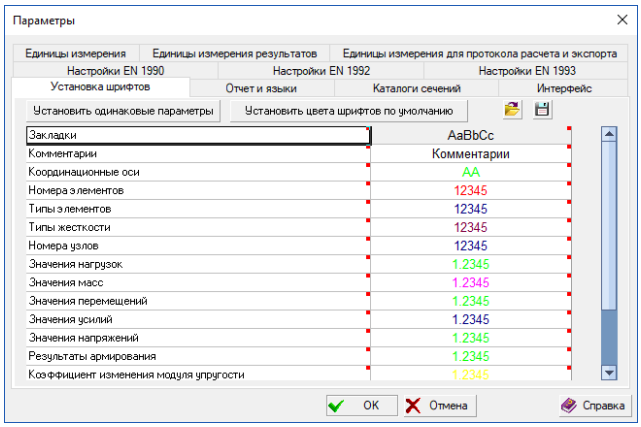



Рис. 35.3-1. *Диалоговое окно* **Параметры**, *страница* **Установка шрифтов**

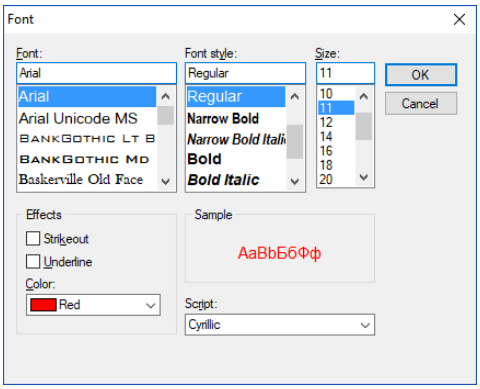



Рис. 35.3-2. *Диалоговое окно* **Шрифт** (Font)

Кнопками левого столбца выбирается вид информации, для которой корректируются настройки шрифта. При нажатии этих кнопок вызывается стандартное диалоговое окно среды Windows **Шрифт** (Font). В этом окне (рис. 35.3-2) назначаются параметры шрифта. Шрифт отображается в информационном поле окна **Установка шрифта**. Если нажать кнопку **OK**, информация на схеме будет выведена в выбранном стиле.

**Шрифт**, названный **Печать отчета**, используется при выводе цифровой информации на рисунках в отчетах формата RTF, DOC, …, а также при выводе данных о цветовой шкале при сохранении вида в векторном формате (кнопка — **Сохранение образа экрана**).

Кнопка **Установить одинаковые параметры** активизирует выпадающее меню, в котором можно выбрать одну из операций — *установить единый цвет всем шрифтам* или *установить единый шрифт*. Кнопка **Установить цвета шрифтов по умолчанию** позволяет установить стандартные значения цветов шрифтов.

Настройки шрифтов можно сохранить во внешнем файле, используя кнопку , и в дальнейшем загрузить этот файл (кнопка ).

## 35.4. Каталоги металлопроката

Если при работе с комплексом используется ограниченный набор каталогов металлопроката, то их включение в список доступных выполняется на странице **Каталоги сечений** (рис. 35.4-1) многостраничного диалогового окна **Параметры**, которое вызывается из пункта **Настройки** одноименного раздела меню.

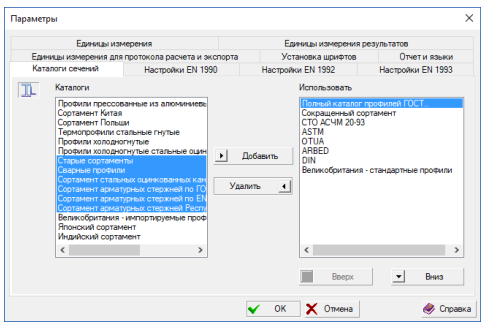



Рис. 35.4-1. *Диалоговое окно* **Каталоги сечений**

Каталоги представлены в виде дерева (каталоги и семейства). Возле каждого семейства имеется маркер. Семейства, у которых маркер снят, не будут появляться в программе. Каталоги можно расположить в удобном для работы порядке (в этом порядке они будут находиться в списке или в диалоговых окнах для выбора элементов металлопроката). Смена порядка следования осуществляется путем перемещения нужного каталога при помощи правой кнопки мыши.

Полный список сортаментов металлопроката, поставляемый с пакетом программ, приведен в приложении.

## 35.5. Отчет и языки

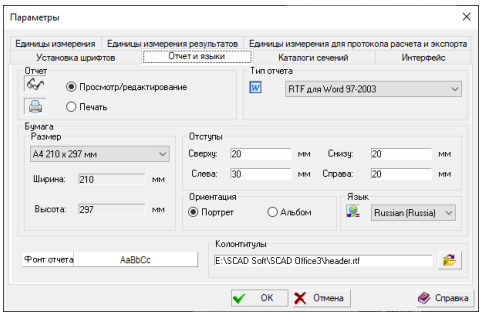



Рис. 35.5-1. *Диалоговое окно* **Отчет и языки**

Страница **Отчет и языки** (рис. 35.5-1) дает возможность выбрать язык, на котором будут представлены все тексты в управляющих окнах и оформлен отчет.

Для работы с отчетным документом может быть выбран режим **Просмотр/Редактирование** или режим **Печать**.

В режиме **Просмотр/Редактирование** нажатие кнопки **Отчет** в любом рабочем окне позволяет просмотреть текст отчета на экране и отредактировать его. Для этого вызывается приложение, ассоциированное с форматом **RTF** (Rich Text Format) файла (например, **MS Word Pad** или **MS Word**).

Естественно, что за исправления, внесенные в текст отчета (а могут быть исправлены и результаты расчета), ответственность несет пользователь.

Существуют различия в формате RTF-файлов, которые используются программами MS Word v.7 и MS Word 97 (2000). В связи с этим в настройках предусмотрена возможность выбора формата в режиме **Тип отчета**.

Нажатие кнопки **Печать** в группе **Отчет** вызывает печать отчета в той форме, в которой он сформирован программой.

В строке **Колонтитулы** можно указать имя RTF-файла, из которого берутся колонтитулы для оформления страниц отчетного документа. Файл выбирается из стандартного списка нажатием кнопки  .

Опция **Размер бумаги** позволяет установить формат бумаги, на которой печатается отчет (размер выбирается из выпадающего списка).

Помимо этого, можно установить отступы и ориентацию листа при формировании отчетного документа.

**Фонт отчета** предназначен для выбора типа фонта в отчетных документах. Двойной щелчок левой кнопки мыши позволяет активировать стандартное окно Windows для настройки шрифта. При формировании отчетов программа будет использовать только выбранный тип шрифта (стиль и размер назначаются программой).

## 35.6. Интерфейс

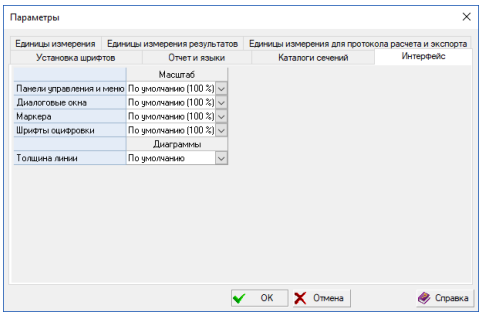



Рис. 35.6-1. *Диалоговое окно* **Интерфейс**

На странице Интерфейс (рис. 35.6-1) можно установить масштабы для различных элементов интерфейса пользователя:

- панелей управления и меню;
- диалоговых окон;
- маркеров;
- шрифтов оцифровки.

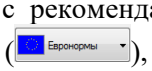
Последние два пункта появляются только для приложений, в которых присутствует возможность графического отображения моделей, например, расчетных схем SCAD.

Кроме того, для приложений, в которых есть отображения графиков и диаграмм, можно установить используемую по умолчанию толщину линий.

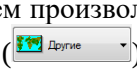
Возможности, которые предоставлены на этой странице, предназначены в первую очередь для настроек параметров при работе на HiDPI мониторах.

## 35.7. Настройки EN 1993

На странице **Настройки EN 1993** (рис. 35.7-1) реализован выбор частных коэффициентов надежности в соответствии с рекомендациями EN 1993-1-1 или в соответствии с национальными приложениями к Eurocode (NAD — National Application Documents). Кроме того, на этой странице предусмотрена возможность определить метод проверки общей устойчивости для сжато-изгибаемых элементов (выбрать соответствующее приложение A или B EN 1993-1-1), ограничить выполнение нормативных проверок в предположении упругих деформаций стали, задать параметр $\rho_{lim}$ учета влияния потери устойчивости элементов сечения на жесткость конструкции в целом, выбрать метод учета сдвигового запаздывания для первой группы предельных состояний, задать параметры $\eta$ для проверки устойчивости стенок на срез, а также определить набор используемых классов болтов (см. рис. 35.7-1).

Если значения частных коэффициентов надежности и других нормативных параметров расчета назначаются в соответствии с рекомендациями EN 1993-1-1, то в выпадающем списке следует выбрать строку с флагом ЕС ( 

), которая установлена по умолчанию. Для использования национальных приложений выбирается строка с флагом соответствующего государства. При этом численные значения соответствующих частных коэффициентов надежности и параметров нормативного расчета отображаются в таблице на странице **Настройки EN 1993**.

Если значения частных коэффициентов надежности или параметров нормативного расчета назначаются пользователем произвольно, тогда в выпадающем списке необходимо выбрать строку, помеченную как **Другие** ( 

). Таким образом обеспечивается возможность использования программы в нестандартных ситуациях, а также при изменениях, вносимых в NAD.

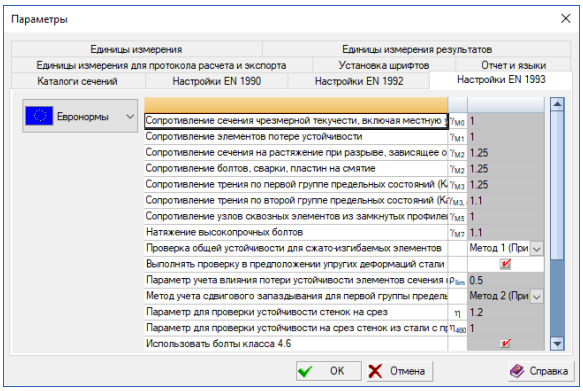



Рис. 35.7-1. *Страница* **Настройки EN 1993**

## 35.8. Настройки визуализации таблиц результатов

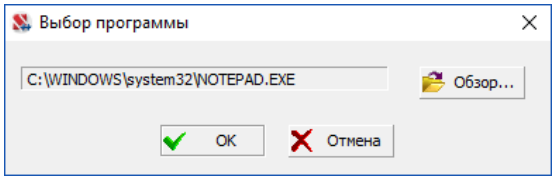



Рис. 35.8-1. *Диалоговое окно* **Выбор программы**

При визуализации текстовых файлов, например, создаваемых при документировании, по умолчанию **SCAD** вызывает текстовый редактор Notepad, который поставляется вместе с операционной системой Windows. Но пользователь может назначить и другой вид текстового редактора. Для этого нужно использовать меню ***Настройки*** (пункт **Настройки визуализации таблиц результатов**) и в диалоговом окне (рис. 35.8-1), нажав кнопку **Обзор**, выбрать нужную программу.

## 35.9. Оформление листов для печати

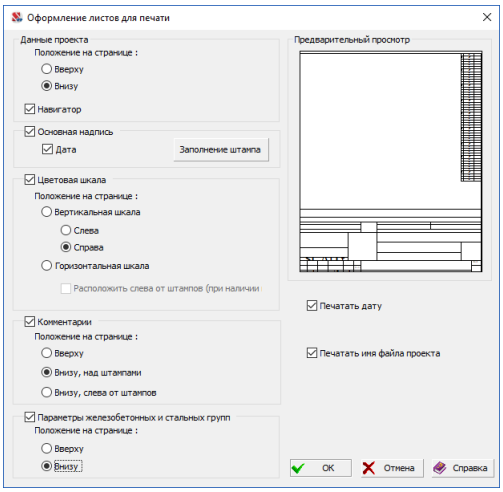



Рис. 35.9-1. *Диалоговое окно* **Оформление листов для печати**

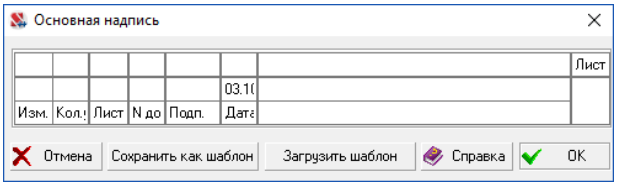



Рис. 35.9-2. *Диалоговое окно* **Основная надпись**

При выводе расчетной схемы на печать с помощью команды  программа производит определенное оформление листов печати (вывод рамки и штампа, отображение цветовой шкалы, вывод данных о проекте и т. д.). Правила оформления листов печати могут быть настроены пользователем. Для этого следует использовать пункт **Оформление листов печати** меню ***Настройки***.

При этом появится диалог (рис. 35.9-1), в котором можно:

- настроить положение на листе данных о проекте (вверху или внизу);
- заказать вывод навигатора;
- выставить маркер, указывающий на необходимость печати основной надписи и даты;
- установить правила вывода цветовой шкалы (вертикальная/горизонтальная, слева/справа);
- выбрать положение комментариев;
- указать расположение параметров с данными конструктивной группы стальных или железобетонных конструкций.

Нажатие кнопки **Заполнение штампа** обеспечивает доступ к диалоговому окну, предназначенному для заполнения штампа листа (рис. 35.9-2). Кнопка **Сохранить как шаблон** позволяет запомнить внесенную информацию как шаблон. Использовать сохраненный шаблон можно как в текущем, так и в других сеансах работы программы, нажав на кнопку **Загрузить шаблон**.

## 35.10. Настройки норм проектирования

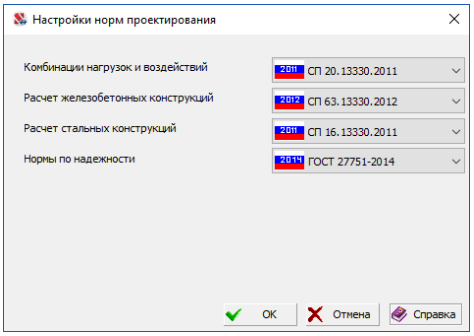



Рис. 35.10-1. *Диалоговое окно* **Настройки норм проектирования**

Операция позволяет изменить нормы проектирования:

- комбинаций нагрузок и воздействий;
- расчета железобетонных конструкций;
- расчета стальных конструкций;
- нормы по надежности.

В диалоговом окне (рис. 35.10-1) из выпадающих списков следует выбрать нужные нормы и нажать кнопку **OK**.

## 35.11. Назначение рабочих директорий

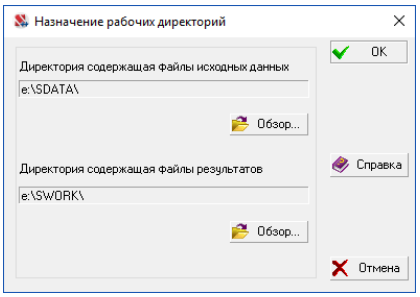



Рис. 35.11-1. *Диалоговое окно* **Назначение рабочих директорий**

Вызываемое этой операцией одноименное диалоговое окно (рис. 35.11-1) позволяет указать имена каталогов, откуда следует взять проект и куда следует помещать рабочие файлы и результаты. Изменить назначение каталогов можно только при условии, что ни один проект не активен, т. е. перед вызовом операции следует предварительно закрыть активный проект (операция **Закрыть проект** в меню ***Файл***).

## 35.12. Настройки табличного представления

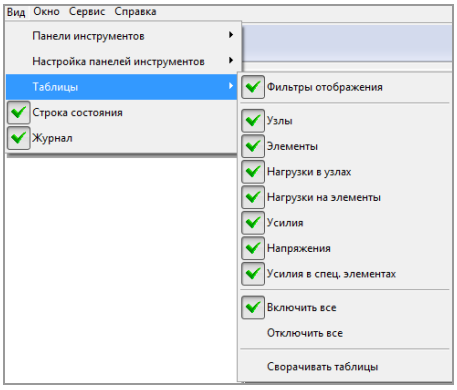



Рис. 35.12-1. *Меню* **Таблицы**

Если программа запущена и нет ни одной открытой модели, то меню **Вид** содержит подменю **Таблицы** (рис. 35.12-1), которое позволяет включить или отключить отображение тех или иных таблиц состояния фильтров, исходных данных и результатов, описанных в разделе 4.1.

Пункты меню **Включить все** и **Отключить все** позволяют соответственно включить/отключить отображение всех таблиц.

Пункт меню **Сворачивать таблицы** позволяет перевести работу программы в режим, при котором по умолчанию при загрузке любой из моделей дерево фильтров и таблицы будут скрыты. Открыть их можно, передвинув вправо разделитель.

## 35.13. Настройка панелей инструментов

Меню **Вид** содержит подменю **Настройка панелей инструментов** (рис. 35.13-1), которое позволяет вызвать диалоговые окна для настройки инструментальной панели **Визуализация** или инструментальной панели **Фильтры**.

При этом появляется диалоговое окно (рис. 35.13-2), в котором перечислены кнопки соответствующей инструментальной панели, а маркеры позволяют отказаться от наличия той или иной кнопки в инструментальной панели.

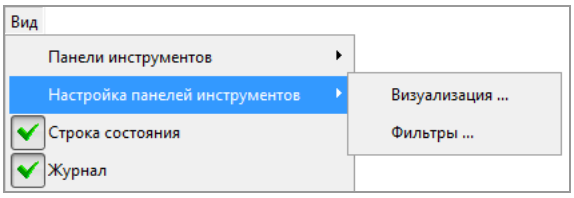



Рис. 35.13-1. *Меню* **Настройка панелей инструментов**

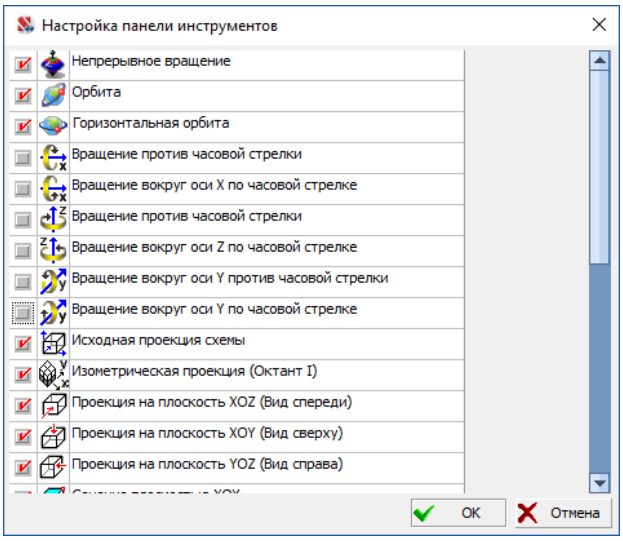



Рис. 35.13-2. *Диалоговое окно* **Настройка панелей инструментов**

# 36. Импорт и экспорт данных SCAD

## 36.1. Импорт расчетных схем

Как правило, расчетная схема не является единственной и, тем более, исходной моделью сооружения. Ей предшествуют архитектурные модели, созданные с помощью специализированных программных средств, называемых системами архитектурного проектирования, к которым можно отнести программы ArchiCAD[1], Allplan[2], Revit[3] и ряд других, специализированных систем для пространственного или плоскостного проектирования определенного класса объектов, например, AdvanceSteel. Все указанные системы создают более или менее подробную модель проектируемого объекта или его части, которая чаще всего содержит информацию о геометрических характеристиках (форма, размер) и иногда о материалах, из которых выполнены элементы сооружения. Для связи с подобными моделями в комплексе **SCAD** реализован режим импорта данных из указанных выше систем и ряда других систем, используемых для геометрического моделирования конструкций, например, графических редакторов типа AutoCAD.

Выбор формата импортируемых данных выполняется из пункта ***Импорт*** в разделе меню ***Файл***.

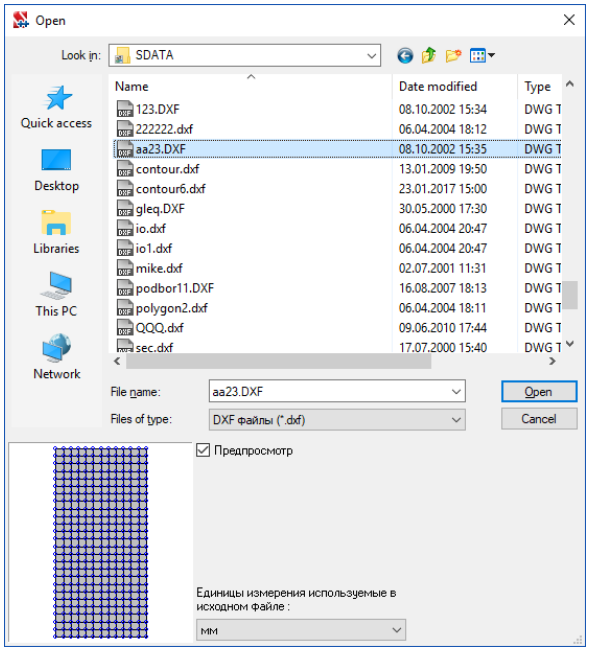



Рис. 36.1-1. *Выбор формата данных*

При импорте файлов того или иного формата появляется стандартное окно операционной системы Windows для выбора импортируемого файла. В этом окне предусмотрена возможность предварительного просмотра, а для некоторых типов файлов, которые не содержат информацию о единицах измерений линейных размеров, появляется список, в котором можно выбрать нужную единицу измерений.

Для всех импортируемых файлов принимаются следующие соглашения по назначению типов конечных элементов в расчетной схеме:

- стержневые элементы — тип 5 (стержень общего вида);
- четырехугольные пластинчатые элементы — четырехузловые элементы оболочки типа 44;
- треугольные пластинчатые элементы — трехузловые элементы оболочки типа 42.

[1] Зарегистрированная торговая марка фирмы Graphisoft.
[2] Зарегистрированная торговая марка фирмы Nemetschek.
[3] Зарегистрированная торговая марка фирмы Autodesk.

В большинстве случаев программа **SCAD** обеспечивает возможность "прямого" чтения файлов (например, файлов DXF, IFC, SDNF, ...). Но для связи с некоторыми программами (Revit, ArchiCAD, Tekla, AllPlan) разработаны специальные расширения (plugin), которые работают в среде соответствующей программы и в результате создают промежуточный файл с расширением **.r2s**, который может быть импортирован программой **SCAD**.

После того, как пользователь выбрал импортируемый файл, появляется окно создания новой модели.

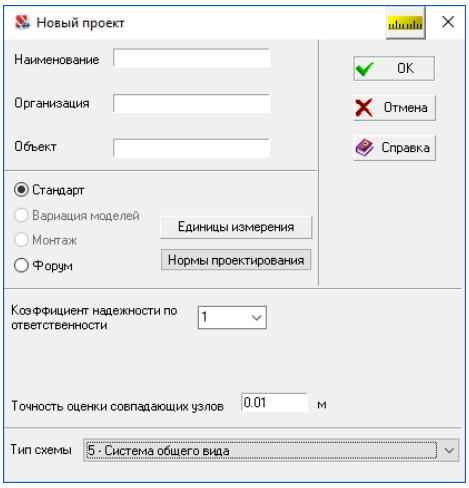



Рис. 36.1-2. *Окно создания новой модели*

В этом окне (в зависимости от содержимого того файла, который импортируется) существует возможность выбора типа файла, получаемого в результате импорта — **SPR** (конечно-элементная модель) или **OPR** (укрупненная модель).

Файл проекта с расширением **.opr** содержит описание укрупненной конструктивной модели здания. Переход от архитектурного решения к расчетной схеме можно представить в виде следующей последовательности операций:

1) построение на основе внутреннего представления данных архитектурной системы укрупненной конструктивной модели здания, состоящей из таких объектов, как колонны, балки, стены, перекрытия (плиты) и крыши;
2) удаление из конструктивной модели объектов, которые не включаются в расчетную схему, например, перегородок, элементов ограждения, архитектурных деталей и т. п.;
3) уточнение, если это необходимо, положения объектов в конструктивной модели и дополнение ее новыми элементами, не учтенными в архитектурном решении;
4) автоматическое или управляемое пользователем построение сетки конечных элементов с одновременным назначением жесткостных характеристик конечным элементам;
5) задание условий опирания и примыкания элементов;
6) ввод нагрузок и специальных исходных данных.

При импорте схемы из моделирующих систем часто возникают проблемы, связанные с передачей данных о сечениях стержневых элементов из металлопроката. В тех случаях, когда программа импорта данных не может однозначно определить характеристики сечения и сортамент, из которого его следует назначать, пользователю предлагается самостоятельно выбрать соответствующие профили. Эти операции выполняются в диалоговом окне **Соответствие профилей** (рис. 36.1-3).

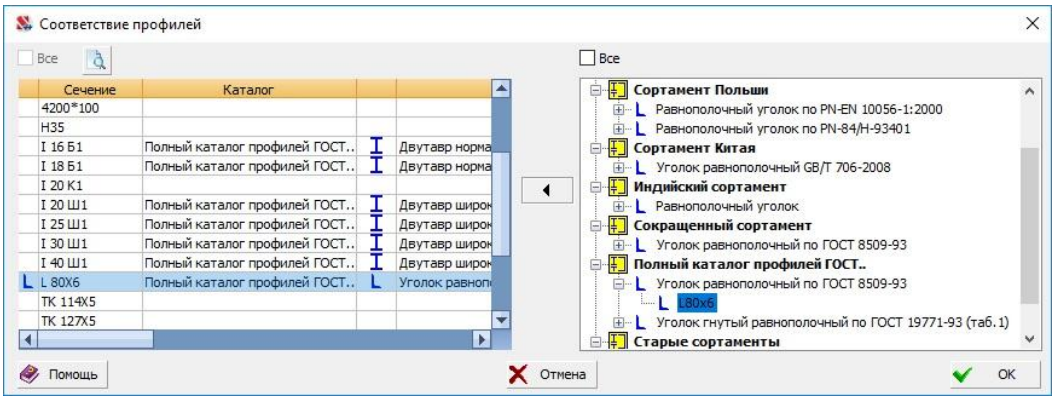



Рис. 36.1-3. *Диалоговое окно* **Соответствие профилей**

Окно включает таблицу со списком сечений и дерево сортаментов стального проката. Если форма сечения и его размеры распознаны программой чтения, то в первой графе таблицы отображается пиктограмма с изображением сечения. В этом случае по умолчанию в дереве сортаментов будут показаны только те каталоги, которые включают сечения подобного типоразмера (для того, чтобы получить доступ ко всем активным каталогам следует активировать маркер **Все** над деревом сортаментов).

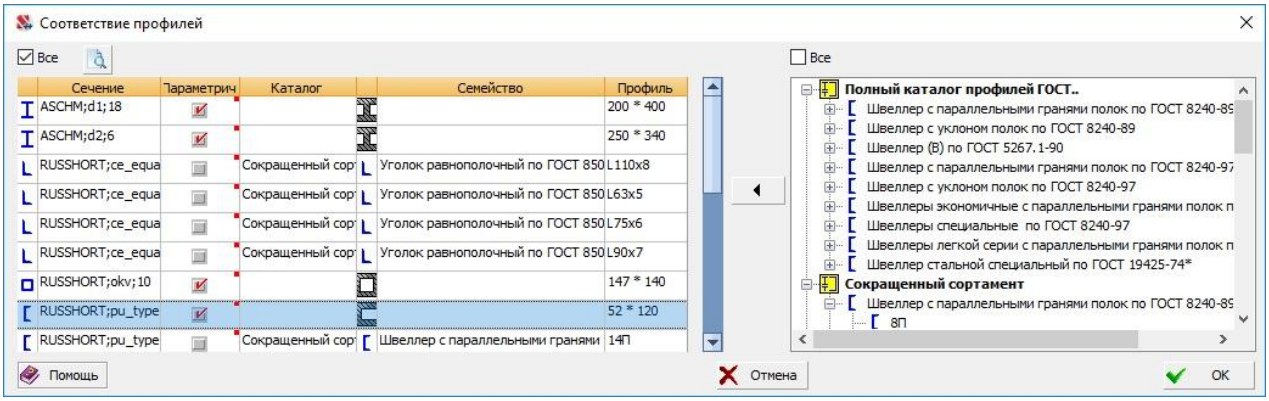



Рис. 36.1-4. *Диалоговое окно* **Соответствие профилей**
(представление **параметрических** сечений)

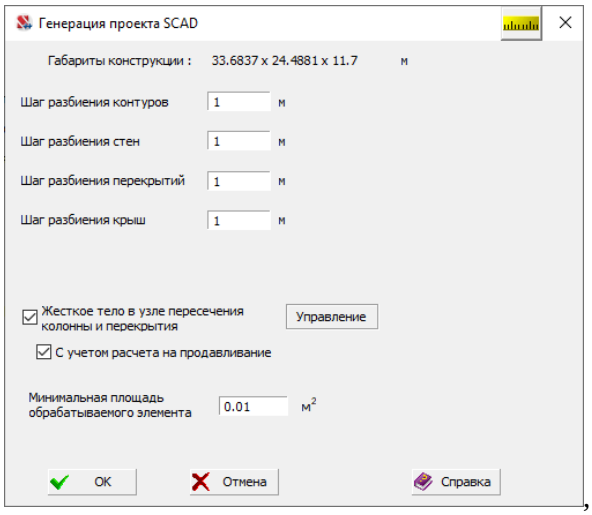
В тех случаях, когда моделирующая система предлагает параметрический вариант сечения, например, двутавр с соответствующими размерами, в таблице сечений окна **Соответствие профилей** (рис. 36.1-4) появляется графа с маркерами. Активным маркером помечаются сечения, которые попадут в расчетную схему, как параметрические. В противном случае сечение должно быть однозначно определено через сортамент.

Во второй графе приводится наименование сечения из импортируемой модели. Оно попадает в расчетную схему в качестве имени типа жесткости. Для того, чтобы назначить сечениям конкретные профили из сортамента следует выполнить следующие действия:

- указанием курсора отметить строку таблицы с наименованием профиля;
- выбрать в дереве нужный каталог металлопроката;
- раскрыть список выбранного семейства профилей;
- указанием курсора отметить строку с нужным размером профиля;
- нажатием кнопки ◀ перенести описание выбранного профиля в отмеченную строку таблицы сечений.

Если выбрана строка с назначенным или распознанным профилем, то можно воспользоваться кнопкой **Предварительный просмотр** —  , по нажатию которой появляется окно с изображением сечения.

Если при импорте файлов формата **.r2s** пользователь выбрал опцию создания конечно-элементной модели (создание spr-файла), то в процессе импорта может появиться диалоговое окно




в котором следует задать параметры разбиения пластинчатых элементов. Данное окно аналогично тому, которое используется в препроцессоре **Форум** при генерации проекта SCAD (см. раздел 9.10).

## Импорт графических файлов

### *Импорт DXF, DWG файлов*

Описание геометрии расчетной схемы может быть импортировано из системы AutoCAD или других систем, поддерживающих форматы DWG- или DXF-файлов. Обрабатываются следующие виды графических примитивов:

3DFACE
SOLID
TRACE
LINE
POLYLINE
LWPOLYLINE
ELLIPSE
CIRCLE
ARC.

При импорте DXF и DWG файлов имеется возможность импорта "обычных" файлов, а также импорта файлов с вложенными блоками.

### *Импорт файлов в формате 3D Studio Max*

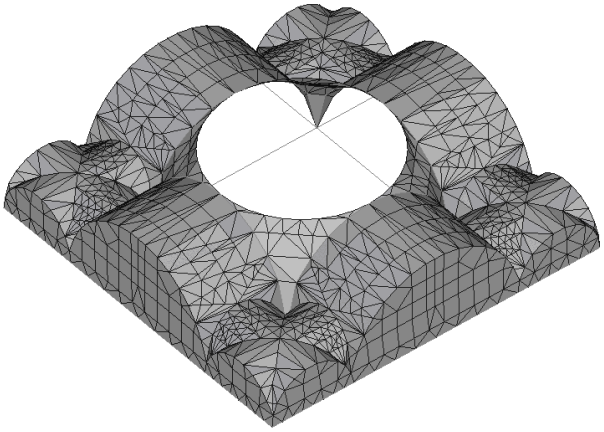


Рис. 36.1-5. *Фрагмент, импортированный из* Autodesk 3D Studio Max

В комплексе реализован импорт файлов в формате системы Autodesk 3D Studio Max (расширение **.3ds**), что позволяет получить геометрию расчетных схем оболочечных конструкций или их фрагменты. Указанная система может быть с успехом использована для генерации геометрических моделей сложных пересекающихся поверхностей, которые импортируются в **SCAD** в виде трехмерной сетки трехузловых элементов оболочки (рис. 36.1-5).

### Импорт файлов в формате SGI Invertor

Файлы в формате SGI Invertor (расширение **.iv**) обеспечивают передачу в комплекс информации о геометрии трехмерных объектов, состоящих из стержней и элементов оболочки.

### Импорт файлов в формате WaveFront Advanced Visualizer

Файлы этого типа используются приложением Advanced Visualizer для хранения информации о трехмерных геометрических объектах. В комплекс передаются данные о стержнях и элементах оболочки.

### Импорт файлов других форматов

Кроме описанных выше, имеется возможность импорта геометрической информации в форматах Movie BYU Surface Geometry (расширение **.byu**), ASCII Stereo Lithography (расширение **.stl**) и Greg Hood ASCII Triangle Format (расширение **.tri**).

## Плагины

### Revit

Плагин к Revit производит экспорт данных о модели в формат R2S, который может быть импортирован в программу **SCAD**.

При экспорте передаются следующие данные ***аналитической*** модели.

Координаты узлов и связи.

Для *стержневых* элементов передается информация о геометрии, ориентации местных осей, материале, жестких вставках и шарнирах. Для криволинейных стержней производится аппроксимация искривленных стержней набором обычных стрежней.

Для *пластинчатых* элементов экспортируется информация о геометрии (включая данные об отверстиях), толщина и данные о материале.

При экспорте *загружений* учитываются только “Hosted” нагрузки, то есть те, которые непосредственно привязаны к элементу или узлу.

Экспортируются все загружения (с сохранением имени).

В каждом загружении реализован экспорт следующих типов нагрузок в глобальной системе координат (Revit не поддерживает возможность задания нагрузок в местной системе координат элемента):

- узловые нагрузки;
- сосредоточенные нагрузки на стержни и пластины;
- равномерно-распределенные и трапециевидные нагрузки на стержни;
- распределенные по линии равномерные и трапециевидные нагрузки на пластины;
- распределенные и трапециевидные нагрузки на пластины.

### ArchiCAD

Плагин к ArchiCAD производит экспорт данных о модели в формат R2S, который может быть импортирован в программу **SCAD**.

При экспорте передаются следующие данные.

Для *стержневых* элементов передается информация о геометрии, ориентации местных осей. Для стержней с круглым или прямоугольным поперечным сечением, при экспорте будут созданы соответствующие жесткостные параметры. Для поперечных сечений с формой отличной от прямоугольника стержневой элемент будет создан, но форма поперечного сечения для него задана не будет.

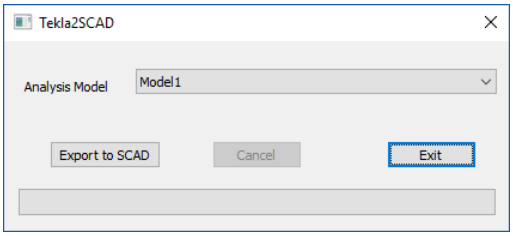
Для *пластинчатых* элементов экспортируется информация о геометрии (включая данные об отверстиях) и толщине, равной сумме толщин несущих слоев. Отделочные слои многослойных материалов не учитываются ни при расчете толщины, ни при расчете координат вершин пластин. Производится аппроксимация искривленных пластин набором обычных пластин. Для пластин с неравномерной толщиной в качестве толщины при экспорте используется усредненная толщина.

## Tekla

### Интерфейс пользователя

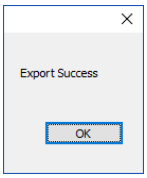
Для использования плагина необходимо создать аналитическую модель с помощью пункта меню Analysis-Analysis & Design Models-New.

Для запуска плагина нужно зайти в меню Detailing-Components-Component Catalog и запустить компонент TeklaToSCAD.




В появившемся окне нужно выбрать созданную ранее модель и нажать на кнопку **Export to SCAD**, после чего будет предложено выбрать имя файла.

По окончанию экспорта данных на экран будет выведено сообщение об окончании.




### Возможности экспорта

Плагин к Tekla производит экспорт данных о модели в формат R2S, который может быть импортирован в программу **SCAD**.

При экспорте передаются следующие данные модели.

Координаты узлов и наложенные связи.

Для *стержневых* элементов передается информация о геометрии (координатах начала и конца каждого элемента), ориентации местных осей, жестких вставках и шарнирах, физических свойствах материала. Для криволинейных стержней производится аппроксимация искривленных стержней набором обычных стрежней. Реализован экспорт следующих типов поперечных сечений стержней — параметрические, сечения металлопроката и пользовательские. Для пользовательских сечений при экспорте создается представление в виде поперечного сечения программы **Консул**. При экспорте сечений металлопроката используется список соответствий между профилями из сортамента **SCAD** и Tekla.

Для *пластинчатых* элементов экспортируется информация о геометрии (включая данные об отверстиях), толщина и данные о материале.

Предусмотрена возможность экспорта данных об абсолютно жестких телах.

Экспортируются все загружения (с сохранением имени).

В каждом загружении реализован экспорт следующих типов нагрузок:

- узловые нагрузки (силы и моменты);
- сосредоточенные и распределенные (равномерные и трапециевидные) нагрузки на стержни в глобальной и местной системах координат;
- сосредоточенные нагрузки на пластины в местной системе координат;
- распределенные по линии нагрузки на ребро пластины;
- равномерно-распределенные и трапециевидные нагрузки на пластины в местной системе координат;
- температурные нагрузки на стержни.

**Ограничения реализации**

Tekla описывает нагрузки на пластины в виде полигона и значений сил или моментов в каждой его вершине. Для нагрузок распределенных по линии Tekla описывает нагрузки в виде отрезка и значений сил или моментов на концах отрезка. Эти нагрузки будут экспортированы лишь в том случае, если координаты вершин полигона (или отрезка) совпадают с координатами вершин плиты.

### IFC

При импорте файлов формата **IFC** реализована поддержка форматов версий 2x3, 4, 4x1, 4x2 как в текстовом виде, так и в формате **XML**.

Для *узлов* импортируются данные о координатах и наложенных связях.

Для *стержневых* элементов передаются данные о геометрии (координаты начала и конца), ориентации местных осей, шарнирах и параметрах поперечного сечения. У стержневого элемента может быть несколько представлений: геометрическое и аналитическое, предпочтение всегда отдается аналитическому. Реализована поддержка двух видов сечений: параметрические и сечения в виде полигонов; последние реализуются в виде поперечного сечения, созданного программой **Консул**.

Для *пластинчатых* элементов передаются данные о геометрии (включая данные об отверстиях) и толщине.

В случае представления пластинчатых элементов в виде набора полигонов (IFC класс - IfcFacetedBrep), преобразование в аналитическую модель происходит следующим образом. Находятся две самые "большие" грани. Если найденные грани параллельны, то они считаются верхом и низом пластины, контур плиты берется в форме большей грани в плоскости посредине между найденными верхней и нижней гранями. Если выбранные грани не параллельны, то такой элемент игнорируется.

Реализован импорт таких видов нагрузок:

- узловые нагрузки (силы и моменты);
- равномерно-распределенные нагрузки на стержни.

В случае, когда в модели присутствуют пластины с числом узлов, превышающим 4, или пластины с отверстиями, создание проекта типа "Стандарт" (*spr*) становится недоступным. В таком случае возможно создать только проект типа "Форум" (*opr*).

**Список основных реализованных IFC классов:**

- Узлы:
  - IfcStructuralPointConnection
- Стержни:
  - IfcStructuralCurveMember
  - IfcStructuralCurveMemberVarying
  - IfcColumn
  - IfcBeam
  - IfcMember
- Пластины:
  - IfcWall
  - IfcWallStandardCase
  - IfcPlate
  - IfcSlab
  - IfcRoof
  - IfcFooting
  - IfcOpeningElement
- Нагрузки:
  - IfcStructuralLoad
  - IfcStructuralLoadStatic
  - IfcStructuralLoadLinearForce

- IfcStructuralLoadSingleForce

### CIS/2

Импорт формата CIS/2 реализован с помощью конвертации файла данного формата в файл формата IFC и последующим импортом IFC-файла. Поэтому все ограничения, связанные с IFC-форматом применимы и к формату CIS/2 и описаны в соответствующем разделе.

### SDNF

При импорте файлов формата SDNF реализована поддержка версий 2.0 и 3.0 данного формата.

Для *стержневых* элементов передается информация о геометрии (координатах начала и конца), ориентации местных осей, жестких вставках, шарнирах и сечении. Формат подразумевает, что в качестве сечения используется профиль из металлопроката; подбор профиля производится с помощью специальной таблицы соответствий между базами профилей **SCAD** и Tekla.

Для *пластинчатых* элементов импортируется информация о геометрии (включая данные об отверстиях и скруглениях) и толщине.

Для *загружений* реализован импорт нагрузок равномерно распределенных на всю длину стержня. Формат не подразумевает наличие других видов нагрузок.

В случае, когда в модели присутствуют пластины с числом узлов, превышающем 4, или пластины с отверстиями, создание проекта типа "Стандарт" (*spr*) становится недоступным. В таком случае возможно создать только проект типа "Форум" (*opr*).

### GMSH

При импорте файлов формата GMSH реализована поддержка как текстового, так и бинарного вида формата; также реализована поддержка формата начиная с версии 2.0.

Для *узлов* импортируются данные о координатах.

Для всех *конечных* элементов реализовано чтение списка основных и дополнительных узлов принадлежащих этим элементам.

Реализована поддержка следующих типов элементов GMSH:

- стержни — типы в GMSH: 1, 8, 26, 27, 28;
- 3-х узловые пластины — типы в GMSH: 2, 9, 20, 21, 22, 23, 24, 25;
- 4-х узловые пластины — типы в GMSH: 3, 10, 16;
- тетраэдры — типы в GMSH: 4, 11, 29, 30, 31;
- шестиузловые призмы — типы в GMSH: 6, 13, 18;
- восьмиузловые призмы — типы в GMSH: 5, 12, 17, 92, 93, 32, 33, 7,14, 19.

### GTC/GTCX/SMLX

При импорте файлов формата GTC, GTCX, SMLX используется библиотеки фирмы Graitec или библиотеки компании Autodesk. Чтобы использовать возможность импорта файлов GTC, GTCX или SMLX формата, на компьютере пользователя должны быть установлены соответствующие продукты компании Graitec (AdvanceSteel и/или AdvanceConcrete) или Autodesk (Autodesk AdvanceSteel и/или Autodesk AdvanceConcrete).

Для *стержневых* элементов импортируется информация о геометрии (координаты начала и конца), ориентации местных осей, жестких вставках, шарнирах, физических свойствах материала, поперечного сечения. Искривленные стержни аппроксимируют набором обычных стержней. Поддерживаются три вида сечений: металлопрокат, параметрические и составные сечения. В случае металлопроката и составных сечений, для подбора профиля, используется специальная таблица соответствий между базами профилей AdvanceSteel и **SCAD**.

Для *пластинчатых* элементов импортируются данные о геометрии (включая отверстия и искривления ребер), толщине и физических свойствах материала.

В случае, когда в модели присутствуют пластины с числом узлов, превышающим 4, или пластины с отверстиями, то создание проекта типа "Стандарт" (*spr*) становится недоступным. В таком случае возможно создать только проект типа "Форум" (*opr*).

### Femap

При импорте файлов формата FNFF (Femap neutral file format) реализовано следующее.

Формат не предусматривает возможности задания единиц измерений, поэтому предполагается, что все данные в системе СИ.

Для *узлов* импортируется информация о координатах и связях.

Для *стержневых* элементов импортируются данные о геометрии (номера начального и конечного узла), ориентации местных осей, шарнирах, жестких вставках, свойствах материала, параметрах поперечного сечения. В случае параметрического сечения передаются его размеры. В ином случае передаются лишь площадь и моменты инерции $I_Y$ и $I_Z$, исходя из этих данных, в **SCAD** производится подбор подходящего сечения из металлопроката.

Для *пластинчатых* элементов импортируются данные о геометрии, свойствах материала и толщине.

Для *объемных* элементов импортируются данные о геометрии и свойствах материала.

Для *упругих связей* импортируются данные о геометрии (номера первого и второго узла), ориентации местных осей и жесткости по всем направлениям.

Для *жестких тел* импортируются данные об узлах и наложенных связях.

Для всех видов *нагрузок*, кроме нагрузок на узлы, передаются только силы, моменты не предусмотрены форматом. Импортируются следующие виды нагрузок:

- узловые нагрузки;
- равномерно-распределенные и трапециевидные нагрузки на стержни в локальной и глобальной системах координат;
- равномерно-распределенные и трапециевидные нагрузки на пластины в локальной и глобальной системах координат;
- равномерно-распределенные нагрузки на грани объемных элементов в глобальной системе координат.

### STAAD

При импорте файлов формата STAAD реализована передача следующих данных.

Поддержка команд: TO, REPEAT, REPEAT ALL.

Для *узлов* передаются их координаты и связи.

Для *стержневых* элементов передается информация о геометрии (номера начального и конечного узла), ориентации местных осей, жестких вставках и шарнирах, физических свойствах материала, параметрах поперечного сечения.

Для *пластинчатых* элементов импортируется информация о геометрии (номера узлов), толщина и данные о материале.

Для *объемных* элементов импортируются данные о геометрии (номера узлов) и свойствах материала.

Для *абсолютно жестких* тел импортируются данные о геометрии (номера узлов) и наложенных связях.

Для *поперечных сечений* стержней передается информация о параметрических сечениях и профилях металлопроката. При импорте сечений металлопроката используется список соответствий между профилями из сортамента **SCAD** и STAAD.

Реализован импорт следующих типов нагрузок:

- узловые нагрузки;
- сосредоточенные нагрузки на стержни;
- равномерно-распределенные и трапециевидные нагрузки на стержни;
- треугольные нагрузки на стержни (такие нагрузки преобразуются к двум трапециевидным);
- сосредоточенные нагрузки на пластины;
- равномерно-распределенные и трапециевидные нагрузки на пластины;
- равномерно-распределенные нагрузки на грани объемных элементов.

### ABAQUS

При импорте файлов формата **Abaqus input file** реализовано следующее.

Для *узлов* импортируются координаты и связи.

Для *стрежневых* элементов импортируются данные о геометрии (номер начального и конечного узлов), ориентации местных осей, материале, шарнирах, жестких вставках (через эксцентриситеты сечений), параметрах поперечного сечения. Формат предоставляет возможность задания 3-х узловых стержней. Если средний узел не используется другими элементами, то он игнорируется, если же используется, то стержень разбивается на два.

Для *пластинчатых* элементов импортируются данные о геометрии, материале, смещении срединной плоскости, толщине и дополнительных узлах.

Для *объемных* элементов импортируются данные о геометрии, материале и дополнительных узлах.

Для *абсолютно жестких* тел импортируются данные о геометрии (список узлов) и наложенных связях.

Для *упругих связей* импортируются данные о геометрии (один или два узла в зависимости от типа связи) и жесткостных параметрах.

Для *коэффициентов упругого основания* передаются данные о коэффициенте $C_1$, в случае стержней этот параметр назначается для местной оси Z.

Импортируются *группы* узлов и элементов.

Для *динамических воздействий* импортируются следующие виды инерционных характеристик:

- массы и моменты инерции для узлов;
- сосредоточенные и распределенные массы для стержневых и пластинчатых элементов.

Импортируются следующие виды нагрузок:

- нагрузки в узле;
- равномерные и трапециевидные нагрузки на стрежни в глобальной и локальной системах координат;
- нагрузки на пластины равномерно-распределенные по линии;
- равномерно-распределенные и трапециевидные нагрузки на пластины в глобальной и локальной системах координат;
- равномерно-распределенные нагрузки на пластины в локальной и глобальной системах координат;
- равномерно-распределенные нагрузки на грань объемного элемента в глобальной системе координат;
- равномерно-распределенные нагрузки на объемные элементы в глобальной системе координат.

*Температурные* нагрузки не поддерживаются в связи с разными способами их задания в ABAQUS и **SCAD**.

Некоторые типы нагрузок в ABAQUS могут задаваться в собственной системе координат. В таких случаях нагрузка переводится в глобальную систему координат.

Так как **SCAD** оперирует размерными величинами в системе СИ, а формат **Abaqus input file** файла не подразумевает возможности указания размерности, то при импорте для пересчета размерных величин, используется дополнительный файл, в котором указаны коэффициенты пересчета. Это обычный текстовый файл, но имеющий расширение **.ccf**. Все размерные значения из inp-файла при импорте будут умножены на соответствующий коэффициент. Если какой-то коэффициент не указан, то считается, что он равен единице. Если файла с коэффициентами не существует, то все коэффициенты считаются равными единице. Для каждой импортируемой модели ABAQUS может быть подготовлен индивидуальный ccf-файл. При импорте будут использованы следующие правила работы с ccf-файлом:

- в той же директории, в которой находится файл с данными (inp-файл), **SCAD** попытается найти файл с таким же именем, но с расширением **.ccf**;
- если такого файла нет, то в этой же директории **SCAD** ищет файл *abaqusunits.ccf*;
- если не найден файл *abaqusunits.ccf*, то все коэффициенты считаются равными единице.

ccf-файл представляет собой текстовый файл в ANSI кодировке. При его создании нужно следовать перечисленным ниже правилам:

- перевод строки обозначается символами 0x0D 0x0A;

- допускаются пустые строки;
- максимальная длина строки — 1000 символов;
- строки начинающиеся с символов ** (две звездочки подряд) считаются комментариями;
- в качестве десятичного разделителя используется символ «.» (точка);
- каждая строка с описанием коэффициента выглядит следующим образом: <название коэффициента><пробел><значение>[ комментарий ];
- названия коэффициентов регистронезависимы.

Для создания и редактирования ccf-файлов рекомендуется использовать Windows Notepad, это позволит избежать проблем с кодировками и переносами строк.

На данный момент предусмотрены следующие коэффициенты:

LENGTH — коэффициент для преобразования линейных размеров, таких как координаты, размеры сечений, толщина плит и т. д. **SCAD** подразумевает, что все линейные размеры заданы в метрах.

FORCE — коэффициент для преобразования силы. **SCAD** подразумевает, что все силы заданы в ньютонах.

DENSITY — коэффициент для преобразования объемного веса. Несмотря на то, что это производная размерность, она задается отдельно. Используется только для задания объемного веса материалов. **SCAD** подразумевает, что объемный вес задан в $Н/м^3$.

YOUNGMODULE — коэффициент для преобразования модуля Юнга. Несмотря на то, что это производная размерность, она задается отдельно. Используется только для задания модуля Юнга материалов. **SCAD** подразумевает, что модуль упругости задан в $Н/м^2$.

ANGLES — коэффициент для преобразования углов. **SCAD** подразумевает, что все углы заданы в градусах.

TEMPERATURE — коэффициент для преобразования температур. Используется при задании коэффициента линейного расширения материалов. **SCAD** подразумевает, что температура задается в градусах Цельсия.

MASS — коэффициент для преобразования масс в инерционных нагрузках: *Mass, *Rotary Inertia, *Nonstructural Mass.

Все производные размерные величины, например, давление или момент сил, пересчитываются с помощью этих же коэффициентов. Исключение составляют: DENSITY, YOUNGMODULE, MASS.

Ниже приведен пример содержимого ccf-файла, который предназначен для импорта inp-файла, в котором данные ABAQUS "задавались" в миллиметрах, радианах и килограммах.

```
**example.ccf
**пример файла с коэффициентами
Angles 0.0174532925199433
**Сила
Force 9.8 переводим килограммы в ньютоны
** Линейные размеры
LENGTH 0.001 переводим миллиметры в метры
```

### ANSYS

При импорте файлов формата ANSYS CDB реализована передача следующих данных.

Для *узлов* передаются их координаты и наложенные связи.

Для *стрежневых* элементов импортируются данные о геометрии (номера узлов), ориентации местных осей, материале, жестких вставках (через эксцентриситет сечений), сечениях. Формат предоставляет возможность задания 3-х узловых стержней. Если средний узел не используется другими элементами, то он игнорируется, если же используется, то стержень разбивается на два.

Для *пластинчатых* элементов импортируется информация о геометрии (номера узлов), толщина и данные о материале.

Для *объемных* элементов импортируются данные о геометрии (номера узлов) и свойствах материала.

Для *абсолютно жестких* тел импортируются данные о геометрии (номера узлов).

Для *упругих связей* импортируются данные о геометрии (номера узлов).

Для *динамических воздействий* импортируются массы и моменты инерции для узлов.

Для *загружений* реализован импорт следующих типов нагрузок:

- узловые нагрузки;
- сосредоточенные нагрузки на стержни;
- равномерные и трапециевидные нагрузки на стержни. Для трапециевидных нагрузок реализована поддержка отступов от концов стержня;
- равномерно распределенные и трапециевидные на пластины;
- равномерно распределенные и трапециевидные на ребра пластин;
- равномерно распределенные на грани объемных элементов.

Также реализована поддержка нагрузок с помощью поверхностей (SURF элементы). Для таких нагрузок производится подбор конечного элемента, состоящего из тех же узлов что и нагруженная поверхность, нагрузка применяется к найденному элементу.

### SAF

SAF представляет собой формат данных, реализованный авторами программы ARCHICAD для описания аналитической модели. При импорте файлов формата SAF реализовано следующее.

Для узлов импортируются координаты и связи.

Для стрежневых элементов импортируются данные о геометрии (номер начального и конечного узлов), ориентации местных осей, материале, шарнирах, жестких вставках (через эксцентриситеты сечений), параметрах поперечного сечения. Искривленные стержни аппроксимируют набором обычных прямолинейных стержней. Поддерживаются четыре вида сечений: металлопрокат, параметрические, составные и сечения, заданные полигоном с отверстиями.

Для пластинчатых элементов импортируются данные о геометрии, материале, смещении срединной плоскости, толщине. Если для плиты заданы регионы другой толщины, то эти регионы заменяются на новые плиты, а в исходную плиту добавляется отверстие.

Для абсолютно жестких тел импортируются данные о геометрии (список узлов) и наложенных связях.

Для упругих связей импортируются данные о геометрии (номера узлов) и жесткости связей.

Для упругих связей импортируются данные о геометрии (номера узлов) и жесткости связей.
Реализован импорт следующих типов *нагрузок*:

- узловые нагрузки;
- сосредоточенные нагрузки на стержни;
- равномерно-распределенные и трапециевидные нагрузки на стержни;
- равномерно-распределенные нагрузки на пластины;
- равномерно распределенные и трапециевидные на ребра пластин.

### SLI

При импорте файлов формата SLI реализована передача следующих данных.

Для *узлов* передаются их координаты, связи и принадлежность к группам объединения перемещений.

Для *стержневых* элементов передается информация о геометрии (номера начального и конечного узла), ориентации местных осей, жестких вставках и шарнирах, физических свойствах материала, параметрах поперечного сечения, коэффициентах упругого основания.

Для *пластинчатых* элементов импортируется информация о геометрии (номера узлов), толщина, данные о материале, коэффициенты упругого основания.

Для *объемных* элементов импортируются данные о геометрии (номера узлов) и свойствах материала.

Для *абсолютно жестких* тел импортируются данные о геометрии (номера узлов) и наложенных связях.

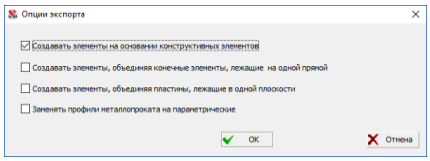
Для *поперечных сечений* стержней передается информация о параметрических сечениях и профилях металлопроката.
Реализован импорт следующих типов *нагрузок*:

- узловые нагрузки;
- сосредоточенные нагрузки на стержни;
- равномерно-распределенные и трапециевидные нагрузки на стержни;
- сосредоточенные нагрузки на пластины;
- равномерно-распределенные нагрузки на пластины;
- равномерный нагрев стержней и пластин;
- изменение температуры по сечению стержня или толщине пластины.

## 36.2. Экспорт данных SCAD

Экспорт данных из программы **SCAD** выполняется как в форматах некоторых расчетных программ (ABAQUS, STAAD, ...), так и в стандартных форматах или ставших стандартными «де факто» (SDNF, IFC, ...). Ниже приведено краткое описание возможностей экспорта.

Отметим, что для некоторых форматов (например, GTC, IFC, SDNF, …) имеется дополнительная возможность объединения конечных элементов в конструктивные элементы. Для этого при активации операции экспорта появляется диалоговое окно, в котором пользователь должен выбрать опции, определяющие правила создания конструктивных элементов.

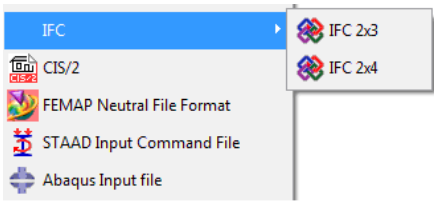



Предусмотрены следующие возможности:

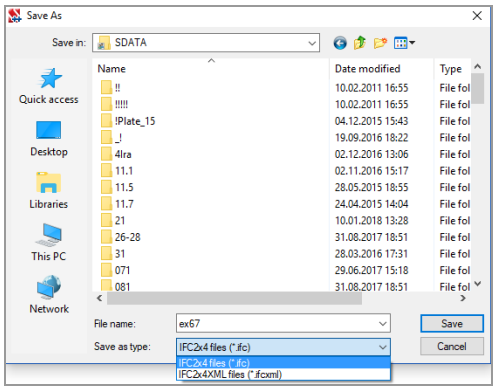
- создавать конструктивные элементы на основании созданных в **SCAD** конструктивных элементов из металлопроката;
- создавать конструктивные элементы путем объединения стержней с одинаковой жесткостью, лежащих на одной прямой и последовательно примыкающих друг к другу;
- создавать конструктивные элементы путем объединения пластинчатых конечных элементов с одинаковой жесткостью, которые расположены в одной плоскости, образуют связную область, контактируя общими узлами;
- для программ, в которых не предусмотрена возможность задания жесткостных характеристик стержней на основании профилей металлопроката, можно заказать преобразование таких жесткостей к параметрическому виду (в противном случае будут просто переданы значения продольной жесткости, изгибных жесткостей, ... ).

### IFC

При экспорте укрупненной модели **SCAD** в формат IFC реализована поддержка версий 2x3 и 4 данного формата:




Кроме того, экспорт может быть выполнен в текстовый вид или в XML-формат:




При экспорте стержневых элементов, в зависимости от положения в пространстве задается вид стержня — балка (горизонтальный элемент) или колонна (элемент, занимающий произвольное положение в пространстве, кроме горизонтального). В терминах IFC это соответствует IfcBeam или IfcColumn. Передается информация о координатах начала и конца стержня, ориентации местных осей и форме поперечного сечения. При этом для параметрически заданных поперечных сечений экспортируется его вид и размеры. Профиля из металлопроката передаются в виде полигонов. Для стержней с типом жесткости, который несовместим с форматом IFC (например, численное описание), создается фиктивное поперечное сечение в виде квадрата со стороной 10 см.

При экспорте пластинчатых элементов, в зависимости от положения в пространстве создается вертикальная стена, наклонная стена, перекрытие или произвольный плоский элемент (в терминах IFC — IfcWallStandardCase, IfcWall, IfcSlab или IfcPlate, соответственно). Передается информация о геометрии (включая данные об отверстиях) и толщина.

***Ограничения реализации:***

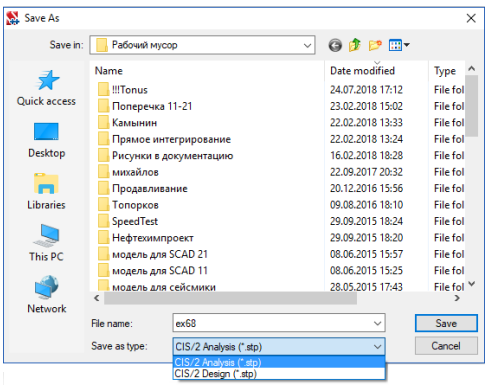
IFC не предусматривает наличие объемных элементов.

IFC не предусматривает возможности задания большинства нагрузок, возможных в **SCAD**, поэтому нагрузки не экспортируются.

IFC не предусматривает стандартизированного метода задания физических свойств материала, поэтому материалы не экспортируются.

## CIS/2

При экспорте укрупненной модели, созданной программой **SCAD**, в формат CIS/2 пользователь может выбрать тип создаваемой CIS/2-модели: аналитическая (Analysis) или графическая (Design).




При использовании **аналитической модели** экспортируются данные:

- координаты узлов и наложенные связи;
- координаты начала и конца каждого стержня, ориентация местных осей, шарниры;
- форма поперечного сечения стержня передается в виде параметрического описания или в виде полигона (в случае, когда в **SCAD** использовались профили металлопроката);
- для стержней с типом жесткости, несовместимым с форматом CIS/2 (например, численное описание), создается фиктивное поперечное сечение в виде квадрата с размерами 10×10 см;

- жесткие вставки моделируются дополнительным стержнем с особыми свойствами материала.

При использовании **графической модели** экспортируются данные:

- координаты начала и конца каждого стержня, ориентация местных осей, шарниры;
- форма поперечного сечения стержня передается в виде параметрического описания или в виде полигона (в случае, когда в **SCAD** использовались профили металлопроката);
- для стержней с типом жесткости, несовместимым с форматом CIS/2 (например, численное описание), создается фиктивное поперечное сечение в виде квадрата со стороной 10 см;
- жесткие вставки моделируются дополнительным стержнем с особыми свойствами материала;
- геометрия и толщина каждого пластинчатого конечного элемента.

***Ограничения реализации:***

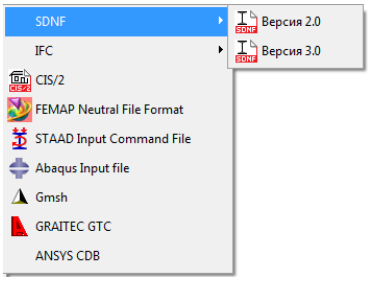
В CIS/2 не предусмотрены объемные элементы, поэтому при экспорте все объемные элементы **SCAD** не появятся в CIS/2-модели.

CIS/2 не предусматривает возможности задания большинства нагрузок, возможных в **SCAD**, поэтому нагрузки не экспортируются.

CIS/2 не предусматривает стандартизированного метода задания физических свойств материала, поэтому материалы не экспортируются.

### SDNF

При экспорте модели **SCAD** в формат SDNF реализована поддержка версий 2.0 и 3.0 данного формата:




Экспортируются данные о:

- координатах начала и конца каждого стержня;
- точке ориентации стержня;
- жестких вставках и шарнирах в стержнях;
- формат SDNF предполагает использование поперечных сечений стержней только в виде профилей металлопроката. При экспорте используется специальная таблица соответствий между базами металлопроката программ **SCAD** и Tekla. Для стержневых элементов **SCAD** с формой поперечного сечения, отличной от металлопроката, экспортируется только информация о координатах начала и конца конечного элемента, шарнирах и жестких вставках;
- геометрии (включая информацию об отверстиях) и толщине пластинчатых элементов.

***Ограничения реализации:***

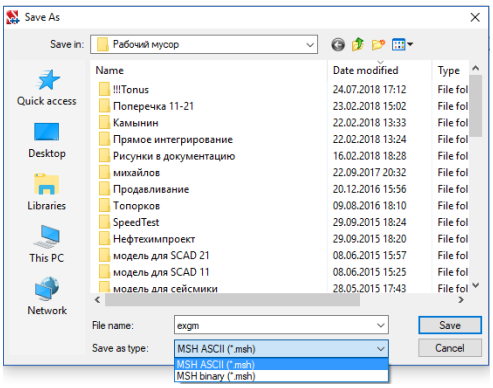
SDNF не позволяет передать информацию об объемных и специальных конечных элементах.

Экспорт нагрузки не реализован, так как в формате SDNF предусмотрен только один вид нагрузок (трапециевидная, у которой начало и конец совпадают с концами стержня).

SDNF не предусматривает возможности задания свойств материала, поэтому материалы не экспортируются.

## GMSH

При экспорте модели, созданной программой **SCAD**, в формат GMSH пользователь может выбрать тип создаваемого msh-файла: текстовый (ASCII) или бинарный (Binary):



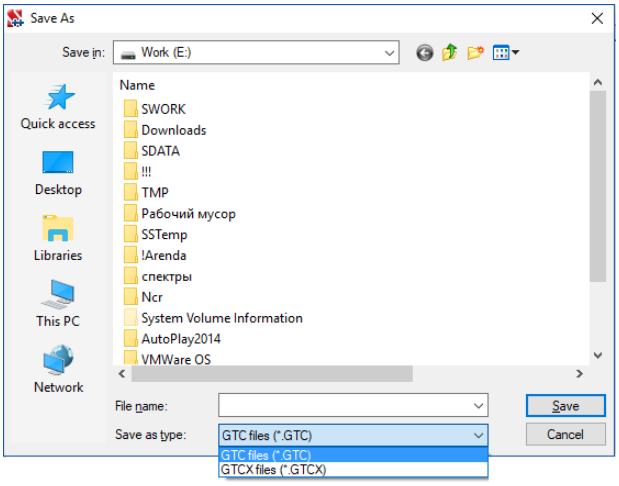

Экспортируется информация о координатах узлов и геометрии стержневых, пластинчатых и объемных элементов.

***Ограничения реализации:***

Такие данные как нагрузки, шарниры, физические свойства материалов и прочее не поддерживаются форматом msh и не экспортируются.

## GTC/GTCX/SMLX

При экспорте модели **SCAD** в форматы GTC, GTCX, SMLX используется библиотеки фирмы Graitec или библиотеки компании Autodesk. Чтобы использовать возможность экспорта в GTC-формат, на компьютере пользователя должны быть установлены соответствующие продукты компании Graitec (AdvanceSteel и/или AdvanceConcrete) или Autodesk (Autodesk AdvanceSteel и/или Autodesk AdvanceConcrete). Пользователь может выбрать формат для экспорта (GTC, GTCX, SMLX):




При экспорте данных о материалах реализована передача таких параметров:

- имя материала (при подборе имени используется файл со списком известных в AdvanceSteel имен и соответствующими характеристиками материалов);
- модуль Юнга;
- коэффициент Пуассона;
- коэффициент линейного расширения;
- плотность;
- тип: сталь, бетон, дерево, пользовательский. **SCAD** при экспорте задает тип на основании анализа величины модуля Юнга.

***Профили для стержней***
Для профилей реализована передача следующих параметров:

- размеры, для параметрических сечений;
- имя, для металлопроката. При экспорте используется список соответствий между профилями из сортамента **SCAD** и AdvanceSteel;
- имя профиля металлопроката и расстояние между профилями (для составных сечений).

***Конечные элементы***
**Стержни**
Для стержневых конечных элементов реализована передача следующих параметров:

- координаты начала и конца стержня;
- ориентация;
- материал;
- профиль;
- шарниры;
- жесткие вставки.

**Плиты**
Для пластинчатых конечных элементов реализована передача следующих параметров:

- геометрия (включая отверстия);
- толщина;
- материал.

***Ограничения реализации:***
Форматом GTC не предусмотрена информация об объемных элементах и нагрузках на элементы.

### Femap

При экспорте в формат FNFF (Femap neutral file format) экспортируются следующие данные:
координаты узлов и наложенные связи;
**для стержневых конечных элементов** (им присваивается тип элемента номер 5) передаются:

- номера узлов;
- ориентация местных осей;
- информация о жестких вставках;
- физические свойства материалов и форма поперечного сечения;

**для 3-х и 4-х узловых пластинчатых элементов** (им присваивается тип элемента номер 17) передаются:

- данные о толщине;
- физические свойства материалов;

**для объемных конечных элементов** (им присваивается тип элемента номер 25 со следующими топологическими подтипами: номер 6, 7 или 8 - для тетраэдра, 3-угольной призмы и 4-угольной призмы соответственно) передаются физические свойства материала;
**для абсолютно жестких тел** (используется тип элемента номер 29) передаются номера узлов и направления связей;
**для элементов, моделирующих упругую связь между узлами** (используется тип элемента номер 6), передаются данные об узлах и параметрах жесткости по всем направлениям.

При экспорте данных о форме поперечного сечения стержня передаются следующие геометрические характеристики:

- площадь;
- периметр;
- моменты инерции;
- момент инерции на кручение;
- условные площади среза.

Для параметрических сечений передаются также их геометрические размеры. Формат FNFF не позволяет передать информацию о сечениях стержней с иной формой.

При экспорте данных о физических свойствах материалов передаются следующие параметры:

- тип: изотропный или ортотропный;
- модуль Юнга;
- коэффициент Пуассона;
- модуль сдвига;
- коэффициент температурного расширения;
- плотность.

При экспорте нагрузок реализовано следующее:

- экспорт узловых сил и моментов;
- передача трапециевидных и равномерно-распределенных нагрузок на стержни (в местной или глобальной системах координат);
- передача трапециевидных и равномерно-распределенных нагрузок на пластины (в местной или глобальной системах координат);
- экспорт нагрузок на грани объемных элементов в глобальной системе координат; для нагрузок, заданных в местной системе координат, при экспорте производится их преобразование в глобальную систему координат.

***Ограничения реализации:***

Формат FNFF не позволяет передать информацию о нагрузках на элементы в виде моментов.

Формат FNFF не предусматривает возможность передать нагрузку на часть стержня, поэтому для таких нагрузок предполагается, что она действуют на всю длину стержня.

Игнорируются равномерно-распределенные нагрузки на объемные элементы.

### STAAD

При экспорте в STAAD передаются следующие данные:

координаты узлов и наложенные связи;

**для стержневых конечных элементов** передаются:

- номера узлов;
- ориентация местных осей;
- информация о жестких вставках;
- физические свойства материалов;
- форма поперечного сечения;

**для 3-х и 4-х узловых пластинчатых элементов** передаются:

- толщина;
- физические свойства материалов;

**для объемных конечных элементов** передаются:

- номера узлов;
- физические свойства материалов;

**при экспорте абсолютно жестких тел** передаются номера узлов и направления связей;

при экспорте данных о физических свойствах материалов передаются следующие параметры:

- тип: изотропный или ортотропный;
- модуль Юнга;
- коэффициент Пуассона;
- модуль сдвига;
- коэффициент температурного расширения;
- плотность.

При экспорте данных о форме поперечного сечения передаются геометрические размеры параметрических сечений. При экспорте используется специальная таблица соответствий между базами металлопроката программ **SCAD** и STAAD. Прочие виды поперечных сечений стержней, реализованные в **SCAD**, не экспортируются ввиду ограничений формата STAAD.

При экспорте нагрузок передаются следующие данные:

- узловые силы и моменты;
- равномерно-распределенные, трапециевидные и сосредоточенные (в глобальной и местной системах координат) нагрузки на стержневые конечные элементы;
- сосредоточенные нагрузки на пластины;
- равномерно-распределенные и трапециевидные нагрузки на пластины;
- равномерно распределенные нагрузки на грань объемных конечных элементов.

***Ограничения реализации:***

Не экспортируются нагрузки на элементы, заданные моментами.

Нагрузки на пластины и объемные конечные элементы в местной системе координат переводятся в глобальную систему координат при экспорте, поскольку STAAD не поддерживает возможность работы с такими нагрузками в местной системе координат.

### ABAQUS

При экспорте из **SCAD** в ABAQUS посредством формата Abaqus input file передаются следующие данные:

координаты узлов и наложенные связи (используя секцию *Boundary ABAQUS);

для стержневых конечных элементов передаются:

- номера узлов;
- ориентация местных осей;
- информация о физических свойствах материалов;
- форма поперечного сечения.

Не реализована передача данных о жестких вставках и шарнирах, поскольку в ABAQUS нет полного аналога этих понятий. В таблице ниже приведено соответствие типов стержневых элементов.

| Тип конечного элемента **SCAD** | Тип конечного элемента ABAQUS |
|---|---|
| 1 | T2D2 |
| 2, 3 | B21 |
| 4 | T3D2 |
| прочие | B31 |

Производится экспорт 3-х и 4-х узловых пластин (включая осесимметричные конечные элементы). Экспортируются данные о толщине, смещении срединной плоскости и физических свойствах материалов. В таблице ниже приведено соответствие типов пластинчатых элементов.

| Тип конечного элемента **SCAD** | Тип конечного элемента ABAQUS |
|---|---|
| 61, 64 | CAX4 |
| 62 | CAX3 |
| Трехузловые пластины | S3 |
| Четырехузловые пластины | S4 |

Для объемных конечных элементов **SCAD** экспортируются данные о физических свойствах материалов. В таблице ниже приведено соответствие типов объемных элементов.

| Тип конечного элемента **SCAD** | Тип конечного элемента ABAQUS |
|---|---|
| Треугольная призма (тип 34) | C3D6 |
| Четырехугольная призма (тип 36) | C3D8 |
| Тетраэдр (тип 32) | C3D4 |

При передаче данных о форме поперечного сечения стержневых конечных элементов с параметрической формой используется следующая таблица соответствий.

| Тип в **SCAD** | ABAQUS section | Тип в **SCAD** | ABAQUS section |
|---|---|---|---|
| S0 | RECT | S4 | ARBITRARY |
| S1 | I | S5 | BOX |
| S2 | I | S6 | PIPE |
| S3 | I | S7 | GENERAL |

Для всех остальных (реализованных в **SCAD**) жесткостных параметров стержней передается только информация о жесткостных характеристиках.

При экспорте данных об упругих связях используется приведенное ниже в таблице соответствие типов конечных элементов.

| Тип конечного элемента SCAD | Тип конечного элемента ABAQUS |
|---|---|
| 51 | Spring1 |
| 55 | SpringA |

Экспортируются данные о группах узлов и группах элементов

| Тип в **SCAD** | Тип в ABAQUS |
|---|---|
| Группа элементов | *Elset |
| Группа узлов | *Nset |

Используя объект *FOUNDATION программы ABAQUS, экспортируются коэффициенты постели $C_1$. Для стержней (в связи с отсутствием полного аналога) передаются только данные для местной оси Z.

При передаче информации о физических свойствах материалов реализована передача параметров, как изотропных так и ортотропных материалов. Передаются следующие данные:

| **SCAD** | ABAQUS |
|---|---|
| Объемный вес | *Density |
| Модуль Юнга | *Elastic |
| Коэффициент Пуассона | *Elastic |
| Коэффициент линейного расширения | *Expansion |

В приведенной ниже таблице содержится информация об экспорте данных о нагрузках.

| **SCAD** | ABAQUS |
|---|---|
| Статические нагрузки на узлы | |
| Узловые нагрузки | *Cload |
| Статические нагрузки на элементы | |
| Нагрузки на стрежни | |
| Распределенная, в глобальной системе координат, по осям X, Y, Z | PX, PY, PZ |
| Распределенная, в местной системе координат, по осям Y, Z | P1, P2 |
| Моменты и остальные нагрузки на стержни | Не поддерживаются в связи с отсутствием аналога в ABAQUS |
| Нагрузки на пластины | |
| Распределенная, в местной или глобальной системе координат, по осям X, Y, Z | TRVEC |

| SCAD | ABAQUS |
|---|---|
| Распределенная по линии, в местной или глобальной системе координат, по осям X, Y, Z | EDLD |
| Моменты и остальные нагрузки на плиты | Не поддерживаются в связи с отсутствием аналога в ABAQUS |
| Нагрузки на объемные элементы | |
| Распределенные на весь объем, в глобальной системе координат, по осям X, Y, Z | BX, BY, BZ |
| Распределенные на грань, в глобальной системе координат, по осям X, Y, Z | TRVEC |
| Динамические нагрузки на узлы | |
| Массы по оси X, Y, Z | *MASS |
| Моменты инерции массы по оси X, Y, Z | *Rotary Inertia |
| Динамические нагрузки на элементы | |
| Распределенные массы на стержни | *Nonstructural Mass, units=MASS PER LENGTH |
| Распределенные массы на плиты | *Nonstructural Mass, units=MASS PER AREA |
| Распределенные массы на объемные элементы | *Nonstructural Mass, units=MASS PER VOLUME |

### ANSYS

При экспорте данных в формат ANSYS CDB реализована передача следующих данных.

Для *узлов* передаются координаты и наложенные связи.

Для *стрежневых* элементов передаются данные о геометрии (номера узлов), ориентации местных осей, материале, шарнирах, жестких вставках, сечениях. Формат не предусматривает возможности задания шарниров и жестких вставок непосредственно на элемент, поэтому они моделируются с помощью дополнительных узлов и связей между ними.

Для *пластинчатых* элементов передаются данные о геометрии, материале, толщине и дополнительных узлах.

Для *объемных* элементов экспортируются данные о геометрии, материале и дополнительных узлах.

Для *абсолютно жестких* тел передаются данные о геометрии и наложенных связях.

Для *динамических воздействий* передаются массы и моменты инерции для узлов.

Для *загружений* передаются следующие виды нагрузок:

- нагрузки в узле;
- равномерные и трапециевидные нагрузки на стрежни в глобальной и локальной системах координат;
- распределенные по линии, равномерные и трапециевидные нагрузки на пластины в глобальной и локальной системах координат;
- равномерно распределенные и трапециевидные нагрузки для пластин в локальной и глобальной системах координат;
- распределенные нагрузки на грань объемного элемента, в глобальной системе координат.

Некоторые нагрузки невозможно задать непосредственно на конечный элемент, в таких случаях создается дополнительный SURF-элемент, состоящий из тех же узлов что и данный конечный элемент, и уже на него применяется нагрузка.

### SAF

При экспорте данных в формат SAF реализована передача следующих данных.

Для узлов передаются координаты и наложенные связи.

Для стрежневых элементов передаются данные о геометрии (номер начального и конечного узлов), ориентации местных осей, материале, шарнирах, жестких вставках, сечениях.

Для пластинчатых элементов передаются данные о геометрии, материале, толщине и смещении срединной плоскости.

***Ограничения реализации:***

Форматом SAF не предусмотрена информация об объемных элементах.

Жесткие тела не передаются, так как формат не позволяет передать их в полной мере.

Не передается информация о специальных элементах типа законтурных конечных элементов, узловых демпферов, ... .

## SLI

При экспорте в SLI передаются следующие данные:

**для узлов** передаются **:**

- координаты узлов;
- наложенные связи;
- информация о принадлежности к группам объединения перемещений;

**для стержневых конечных элементов** передаются:

- номера узлов;
- ориентация местных осей;
- информация о жестких вставках;
- информация о шарнирах;
- физические свойства материалов;
- форма поперечного сечения;
- коэффициенты упругого основания

**для 3-х и 4-х узловых пластинчатых элементов** передаются:

- толщина;
- физические свойства материалов;
- коэффициенты упругого основания

**для объемных конечных элементов** передаются:

- номера узлов;
- физические свойства материалов;

**при экспорте абсолютно жестких тел** передаются номера узлов и направления связей;

**при экспорте данных о физических свойствах материалов** передаются следующие параметры:

- тип: изотропный или ортотропный;
- модуль Юнга;
- коэффициент Пуассона;
- модуль сдвига;
- плотность.

**при экспорте данных о форме поперечного** сечения передаются геометрические размеры, площадь и моменты инерции. Для металлопроката передается еще и имя сечения.

**при экспорте нагрузок** передаются следующие данные:

- узловые силы и моменты;
- равномерно-распределенные, трапециевидные и сосредоточенные (в глобальной и местной системах координат) нагрузки на стержневые конечные элементы;
- сосредоточенные нагрузки на пластины;
- равномерно-распределенные нагрузки на пластины;
- равномерный нагрев стержней и пластин;
- изменение температуры по сечению стержня или толщине пластины;

***Ограничения реализации:***

Не экспортируются нагрузки на объемные конечные элементы.

# Приложения

## Список сортаментов прокатных профилей

| Имя сортамента | Имя файла в корневом каталоге | Сокращение для текстового файла |
|---|---|---|
| Полный каталог профилей ГОСТ | russian.prf | Russian |
| Сокращенный сортамент ГОСТ | Russhort.prf | Russhort |
| Старые сортаменты | Rus_old.prf | Rus_old |
| Сортамент Челябинского металлургического комбината (СТО АСЧМ 20-93) | Aschm.prf | Aschm |
| Великобритания, стандартные профили | British1.prf | British1 |
| Великобритания, импортируемые профили | British3.prf | British3 |
| Сварные профили | WELD.PRF | WELD |
| OTUA | Otua.prf | Otua |
| DIN | Din.prf | Din |
| ARBED | ARBED.PRF | ARBED |
| ASTM | Usa.prf | Usa |
| Индийский сортамент | India.prf | India |
| Японский сортамент | Japan.prf | Japan |
| Сортамент стальных оцинкованных канатов по ГОСТ | Cable.prf | cable |
| Сортамент арматурных стержней по ГОСТ | RebarRU.prf | RebarRu |
| Сортамент арматурных стержней Республики Беларусь | RebarBY.prf | RebarBY |
| Сортамент арматурных стержней по ENV 10080:1996 | RebarEC.prf | RebarEC |
| Сортамент Польши | POLAND.PRF | POLAND |
| Термопрофили стальные гнутые | TERM2007.PRF | TERM2007 |
| Профили холодногнутые | TU1121.PRF | TU1121 |
| Профили холодногнутые стальные оцинкованные | TU112101.PRF | TU112101 |
| Холодногнутые профили украинских производителей | Ukraine.PRF | Ukraine |
| Сортамент Китая | China.prf | China |
| Украинский сортамент металлопроката | UA.prf | UA |
| Профили прессованные из алюминиевых сплавов | ALUM.prf | ALUM |
| Холодногнутые профили RUUKKI | Ruukki.prf | Ruukki |
| Холодногнутые профили Прушиньски | Pruszynski.prf | Pruszynski |

В данной таблице приведены имена разделов баз металлопроката, которые используются в текстовом файле:

| Имя раздела | Содержание |
|---|---|
| ***Список разделов полного каталога профилей ГОСТ*** | |
| ce_equal | Уголок равнополочный по ГОСТ 8509-93 |
| ci_uneq | Уголок неравнополочный по ГОСТ 8510-86* |
| pu_typep | Швеллер с параллельными гранями полок по ГОСТ 8240-89 |
| pu_vagon | Швеллер (В) по ГОСТ 5267.1-90 |
| pu_uklon | Швеллер с уклоном полок по ГОСТ 8240-89 |
| P_col_k | Двутавр колонный (К) по ГОСТ 26020-83 |
| P_uklon | Двутавр с уклоном полок по ГОСТ 8239-89 |
| P_add_d | Двутавр дополнительной серии (Д) по ГОСТ 26020-83 |
| P_norm_b | Двутавр нормальный (Б) по ГОСТ 26020-83 |
| P_wide_h | Двутавр широкополочный по ГОСТ 26020-83 |
| tavr_KT | Тавры колонные (КТ) по ТУ 14-2-685-86 |

| Имя раздела | Содержание |
|---|---|
| tavr_ST | Тавр ШТ по ТУ 14-2-685-86 |
| diam | Трубы электросварные прямошовные по ГОСТ 10704-91 |
| diamold | Трубы по ГОСТ 10704-91 (сокращенные) |
| pipe8732 | Трубы стальные бесшовные горячедеформированные |
| DIAM54157 | Круглые трубы по ГОСТ Р 54157-2010 |
| cg | Гнутый равнополочный швеллер по ГОСТ 8278-83 из сталей С239-С245 |
| cg2 | Гнутый равнополочный швеллер по ГОСТ 8278-83 из сталей С255-С275 |
| OKV | Квадратные трубы по ТУ 36-2287-80 |
| ORECT | Прямоугольные трубы по ТУ 67-2287-80 |
| PU_Ec97 | Швеллеры экономичные с параллельными гранями полок по ГОСТ 8240-97 |
| PU_LT97 | Швеллеры легкой серии с параллельными гранями полок по ГОСТ 8240-97 |
| PU_Spc97 | Швеллеры специальные по ГОСТ 8240-97 |
| PU_typ97 | Швеллер с параллельными гранями полок по ГОСТ 8240-97 |
| PU_ukl97 | Швеллер с уклоном полок по ГОСТ 8240-97 |
| PU_19425 | Швеллер стальной специальный по ГОСТ 19425-74* |
| P_19425 | Двутавр стальной специальный по ГОСТ 19425-74* |
| OKV66 | Квадратные трубы по ГОСТ 12336-66 |
| OKV54157 | Квадратные трубы по ГОСТ Р 54157-2010 |
| ORECT66 | Прямоугольные трубы по ГОСТ 12336-66 |
| ORECT54157 | Прямоугольные трубы по ГОСТ Р 54157-2010 |
| kv_truba | Трубы стальные квадратные по ГОСТ 8639-68 |
| pr_truba | Трубы стальные прямоугольные по ГОСТ 8645-68 |
| OKV77 | Квадратные трубы по ГОСТ 25577-83* |
| ORECT77 | Прямоугольные трубы по ГОСТ 25577-83* |
| OKV30245 | Квадратные трубы по ГОСТ 30245-94 |
| REC30245 | Прямоугольные трубы по ГОСТ 30245-94 |
| okv2003 | Стальные гнутые замкнутые сварные квадратные профили по ГОСТ 30245-2003 |
| orect2003 | Стальные гнутые замкнутые сварные прямоугольные профили по ГОСТ 30245-2003 |
| kv82_truba | Трубы стальные квадратные по ГОСТ 8639-82 |
| Round | Сталь калиброванная круглая по ГОСТ 7417-75 |
| 2590 | Прокат стальной горячекатаный круглый ГОСТ 2590-88 |
| S_259188 | Прокат стальной горячекатаный квадратный ГОСТ 2591-88 |
| okv2012 | Стальные гнутые замкнутые сварные квадратные профили по ГОСТ 30245-2012 |
| orct2012 | Стальные гнутые замкнутые сварные прямоугольные профили по ГОСТ 30245-2012 |
| 19771_1 | Уголок гнутый равнополочный по ГОСТ 19771-93 (таб.1) |
| 19771_2 | Уголок гнутый равнополочный по ГОСТ 19771-93 (таб.2) |
| 19772_1 | Уголок неравнополочный гнутый по ГОСТ 19772-93 (таб.1) |
| 19772_2 | Уголок неравнополочный гнутый по ГОСТ 19772-93 (таб.2) |
| 259006 | Прокат стальной горячекатаный круглый ГОСТ 2590-2006 |
| S_259106 | Прокат стальной горячекатаный квадратный ГОСТ 2591-2006 |
| Pipe1381 | Трубы по ТУ 1381-103-05757848-2013 |
| DTV016SH | Двутавр широкополочный по ТУ 0925-016-00186269-2016 |
| DTV036SH | Двутавр широкополочный по ТУ 0925-036-00186269-2016 |
| DTVR016K | Двутавр колонный по ТУ 0925-016-00186269-2016 |
| DTVR016S | Двутавр среднеполочный по ТУ 0925-016-00186269-2016 |
| DTVR016N | Двутавр нормальный по ТУ 0925-016-00186269-2016 |
| DTVR036K | Двутавр колонный по ТУ 0925-036-00186269-2016 |
| DTVR036N | Двутавр нормальный по ТУ 0925-036-00186269-2016 |
| DTVR036S | Двутавр свайный по ТУ 0925-036-00186269-2016 |
| DTVR016U | Двутавр узкополочный по ТУ 0925-016-00186269-2016 |
| TU016_U | Двутавр узкополочный по ТУ 24107-016-00186269-2017 |
| TU016_N | Двутавр нормальный по ТУ 24107-016-00186269-2017 |
| TU016_Sr | Двутавр среднеполочный по ТУ 24107-016-00186269-2017 |

| Имя раздела | Содержание |
|---|---|
| TU016_Sh | Двутавр широкополочный по ТУ 24107-016-00186269-2017 |
| TU016_K | Двутавр колонный по ТУ 24107-016-00186269-2017 |
| TU036_N | Двутавр нормальный по ТУ 24107-036-00186269-2017 |
| TU036_K | Двутавр колонный по ТУ 24107-036-00186269-2017 |
| TU036_Sh | Двутавр широкополочный по ТУ 24107-036-00186269-2017 |
| TU036_Sv | Двутавр свайный по ТУ 24107-036-00186269-2017 |
| C_32931 | Круглые трубы по ГОСТ 32931-2015 |
| S_32931 | Квадратные трубы по ГОСТ 32931-2015 |
| R_32931 | Прямоугольные трубы по ГОСТ 32931-2015 |
| G57837DB | Двутавр дополнительный балочный по ГОСТ Р 57837-2017 |
| G57837DK | Двутавр дополнительный колонный по ГОСТ Р 57837-2017 |
| G57837Sh | Двутавр балочный широкополочный по ГОСТ Р 57837-2017 |
| G57837_B | Двутавр балочный нормальный по ГОСТ Р 57837-2017 |
| G57837_K | Двутавр колонный по ГОСТ Р 57837-2017 |
| G57837_S | Двутавр свайный по ГОСТ Р 57837-2017 |
| C_58064 | Круглые сварные трубы по ГОСТ Р 58064-2018 |
| C57837DB | Двутавр дополнительный балочный по ГОСТ Р 57837-2017 изменение №1 |
| C57837DK | Двутавр дополнительный колонный по ГОСТ Р 57837-2017 изменение №1 |
| C57837Sh | Двутавр балочный широкополочный по ГОСТ Р 57837-2017 изменение №1 |
| 19903_15 | Прокат листовой горячекатаный по ГОСТ 19903-2015 |
| 19904 | Прокат листовой холоднокатаный по ГОСТ 19904-90 |
| 19903_74 | Сталь листовая горячекатаная по ГОСТ 19903-74 |
| 103-76 | Полоса стальная горячекатаная по ГОСТ 103-76 |
| 103-2006 | Прокат листовой стальной горячекатаный полосовой по ГОСТ 103-2006 |
| 82-70 | Прокат стальной горячекатаный широкополосный универсальный по ГОСТ 82-70 |
| 1990374p | Сталь листовая горячекатаная по ГОСТ 19903-74 (рулон) |
| 1990315p | Прокат листовой горячекатаный по ГОСТ 19903-2015 (рулон) |
| ***Список разделов сокращенного сортамента ГОСТ*** | |
| ce_equal | Уголок равнополочный по ГОСТ 8509-93 |
| ci_uneq | Уголок неравнополочный по ГОСТ 8510-86* |
| pu_typep | Швеллер с параллельными гранями полок по ГОСТ 8240-89 |
| P_col_k | Двутавр колонный (К) по ГОСТ 26020-83 |
| P_uklon | Двутавр с уклоном полок по ГОСТ 8239-89 |
| Pu_uklon | Швеллер с уклоном полок по ГОСТ 8240-89 |
| P_add_d | Двутавр дополнительной серии (Д) по ГОСТ 26020-83 |
| P_norm_b | Двутавр нормальный (Б) по ГОСТ 26020-83 |
| P_wide_h | Двутавр широкополочный по ГОСТ 26020-83 |
| tavr_KT | Тавры колонные (КТ) по ТУ 14-2-685-86 |
| tavr_ST | Тавр ШТ по ТУ 14-2-685-86 |
| diam | Трубы электросварные прямошовные по ГОСТ 10704-91 |
| cg | Гнутый равнополочный швеллер по ГОСТ 8278-83 из сталей С239-С245 |
| cg2 | Гнутый равнополочный швеллер по ГОСТ 8278-83 из сталей С255-С275 |
| OKV | Квадратные трубы по ТУ 36-2287-80 |
| ORECT | Прямоугольные трубы по ТУ 67-2287-80 |
| ***Список разделов сортамента Челябинского металлургического комбината*** | |
| d1 | Двутавр нормальный (Б) по СТО АСЧМ 20-93 |
| d2 | Двутавр широкополочный по СТО АСЧМ 20-93 |
| d3 | Двутавр колонный (К) по СТО АСЧМ 20-93 |
| d4 | Двутавр по Р40-93 |
| d5 | Специальные двутавры по СТО АСЧМ 20-93 |
| ***Список разделов старых сортаментов*** | |
| l1 | Уголок равнополочный по ОСТ 14-1926 |

| Имя раздела | Содержание |
|---|---|
| l2 | Уголок равнополочный по ОСТ 14-1932 |
| L3 | Уголок неравнополочный по ОСТ 15-1926 |
| L4 | Уголок неравнополочный по ОСТ 15-1932 |
| i1 | Двутавр балочный по ОСТ 16-1926 |
| I2 | Двутавр балочный по ОСТ 16-1932 |
| c1 | Швеллер с уклоном полок по ОСТ 17-1926 |
| C2 | Швеллер с уклоном полок по ОСТ 17-1933 |
| Dtavr39 | Балки двутавровые по ОСТ 10016-39 |
| Channel39 | Швеллер по ОСТ 10017-39 |
| Equal39 | Уголок равнополочный по ОСТ 10014-39 |
| EnEqual39 | Уголок неравнополочный по ОСТ 10015-39 |
| IPB | Двутавр IPB по ДИН 1025 |
| IPB1 | Двутавр IPB1 по ДИН 1025 |
| IPBv | Двутавр IPBv по ДИН 1025 |
| IPE | Двутавр IPE по ДИН 1025 |
| IPEo | Двутавр IPEo по ДИН 1025 |
| IPEv | Двутавр IPEv по ДИН 1025 |
| ***Список разделов сортамента Великобритании, стандартные профили*** | |
| ub_bs4 | Двутавр Universal Beams по BS 4-1:1993 |
| uc_bs4 | Двутавр Universal Columns по BS 4-1:1993 |
| ubp_bs4 | Двутавр Universal Bearing Piles по BS 4-1:1993 |
| rhs_uk | Труба прямоугольная EN10210 (UK) |
| chs_uk | Труба круглая EN10210(UK) |
| shs_uk | Труба квадратная EN10210 (UK) |
| joists | Двутавр Joists |
| equal | Уголок равнополочный по BS EN 10056-1:1999 |
| unequal | Уголок неравнополочный |
| channel | Швеллер |
| t_ub_bs4 | Тавр Tees from UBs to BS4 |
| t_uc_bs4 | Тавр Tees from UCs to BS4 |
| Circular | Труба круглая EN10219-2:2006(E) |
| Square | Труба квадратная EN10219-2:2006 (E) |
| Rectangl | Труба прямоугольная EN10219-2:2006 (E) |
| ***Список разделов сортамента Великобритании, импортируемые профили*** | |
| astm | Двутавр ASTM Shapes |
| ipe | Двутавр Euronorm IPE Sections |
| he | Двутавр Euronorm HE Sections |
| rhs_os | Труба прямоугольная EN10210 (OS) |
| chs_os | Труба круглая EN10210 (OS) |
| shs_os | Труба квадратная EN10210 (OS) |
| ***Список разделов OTUA*** | |
| ce_5677 | Равнополочный уголок (NF A 45-009) |
| ci_5778 | Неравнополочный уголок (NF A 45-010) |
| P_ipn | Двутавр с уклоном полок IPN (NF A 45-209) |
| P_pa | Двутавр с параллельными полками PA (NF A 45-205) |
| P_ipea | Двутавр с параллельными полками IPE-A (NF A 45-205) |
| P_ipe | Двутавр с параллельными полками IPE (NF A 45-205) |
| P_iper | Двутавр с параллельными полками IPE-R (NF A 45-205) |
| P_heaa | Двутавр с параллельными полками HEA-A (NF A 45-201) |
| P_hea | Двутавр с параллельными полками HEA (NF A 45-201) |
| P_heb | Двутавр с параллельными полками HEB (NF A 45-201) |
| P_hem | Двутавр с параллельными полками HEM, HEC (NF A 45-201) |

| Имя раздела | Содержание |
|---|---|
| Dp_pa | Тавр PA (NF A 45-205) |
| Dp_ipea | Тавр IPE-A (NF A 45-205) |
| Dp_ipe | Тавр IPE (NF A 45-205) |
| Dp_iper | Тавр IPE-R (NF A 45-205) |
| Dp_heaa | Тавр HEA-A (NF A 45-211) |
| Dp_hea | Тавр HEA (NF A 45-201) |
| Dp_heb | Тавр HEB (NF A 45-201) |
| Dp_hem | Тавр HEM, HEC (NF A 45-201) |
| Upn | Швеллер UPN (NF A 45-202) |
| Upna | Швеллер UPN-A (NF A 45-202) |
| Uap | Швеллер UAP (NF A 45-255) |
| Uapa | Швеллер UAP-A (NF A 45-255) |
| round | Труба круглая |
| rect | Труба прямоугольная |
| square | Труба квадратная |
| ***Список разделов DIN*** | |
| Equal | Равнополочный уголок по DIN 1028 |
| Unequal | Неравнополочный уголок по DIN 1029 |
| Dtavr_1 | Балки двутавровые по DIN 1025 |
| Dtavr_2 | Широкополочные двутавры по DIN 1025 (с параллельными гранями) |
| Dtavr_3 | Широкополочные двутавры по DIN 1025 (9% уклон) |
| Chanel | Швеллеры по DIN 1026 |
| Round | Труба круглая DIN 2448 |
| Rect | Труба прямоугольная DIN 59410 |
| Square | Труба квадратная DIN 59410 |
| ***Список разделов ARBED*** | |
| ARB_Equal | Равнополочный уголок по Euronorm 56-77 |
| ARB_Unequal | Неравнополочный уголок по Euronorm 57-78 |
| ARB_ipe | Двутавр IPE Euronorm 19-57 |
| ARB_ipn | Двутавр IPN по NF A 45-209 |
| ARB_he | Двутавр HE Euronorm 53-62 |
| ARB_hl | Двутавр HL Euronorm 53-62 |
| ARB_hd | Двутавр HD |
| ARB_hp | Двутавр HP |
| ARB_w | Двутавр W |
| ARB_ub | Двутавр UB по BS 4-1:1993 |
| ARB_uc | Двутавр UC по BS 4-1:1993 |
| ARB_uap | Швеллер UAP по NF A 45-255 |
| ARB_upn | Швеллер UPN по NF A 45-202 |
| ***Список разделов ASTM*** | |
| Equal | Равнополочный уголок |
| Unequal | Неравнополочный уголок |
| Dtavr_HP | Двутавр HP по ASTM A6/A6M-98 |
| Dtavr_M | Двутавр M |
| Dtavr_S | Двутавр S |
| Dtavr_W | Двутавр W по ASTM A6/A6M-98 |
| Tavr_MT | Тавр MT |
| Tavr_ST | Тавр ST |
| Tavr_WT | Тавр WT |
| Sh_C | Швеллер C |
| Sh_MC | Швеллер MC |
| Tube_P | Труба круглая P |

| Имя раздела | Содержание |
|---|---|
| Tube_PX | Труба круглая PX |
| Tube_PXX | Труба круглая PXX |
| Tube_TS | Труба квадратная |
| Tube_TR | Труба прямоугольная |
| ***Список разделов сортамента сварных профилей*** | |
| tv | Двутавры сварные по ТУ У 01412851.001-95 |
| P_NORM_B | Двутавр сварной серии (Б) взамен ГОСТ 26020-83 (ТУ 0925-001-97638531-2016) |
| D1 | Двутавр сварной серии (Б) взамен СТО АСЧМ 20-93 (ТУ 0925-001-97638531-2016) |
| P_COL_K | Двутавр сварной серии (К) взамен ГОСТ 26020-83 (ТУ 0925-001-97638531-2016) |
| D3 | Двутавр сварной серии (К) взамен СТО АСЧМ 20-93 (ТУ 0925-001-97638531-2016) |
| P_ WIDE_H | Двутавр сварной серии (Ш) взамен ГОСТ 26020-83 (ТУ 0925-001-97638531-2016) |
| D2 | Двутавр сварной широкополочный серии (Ш) взамен СТО АСЧМ 20-93 (ТУ 0925-001-97638531-2016) |
| TU_CTO | Двутавр сварной по ТУ 0925-001-97638531-2016 |
| D1_002.tot | Двутавр сварной серии (Б) взамен СТО АСЧМ 20-93 (ТУ 0925-002-62017235-2016) |
| D2_002.tot | Двутавр сварной широкополочный серии (Ш) взамен СТО АСЧМ 20-93 (ТУ 0925-002-62017235-2016) |
| D3_002.tot | Двутавр сварной серии (К) взамен СТО АСЧМ 20-93 (ТУ 0925-002-62017235-2016) |
| TU_CTO_D | Двутавры сварные ГК Евроангар_01_2020 |
| G58966DB | Двутавр дополнительный балочный сварной по ГОСТ Р 58966-2020 |
| G58966DK | Двутавр дополнительный колонный сварной по ГОСТ Р 58966-2020 |
| G58966Sh | Двутавр балочный широкополочный сварной по ГОСТ Р 58966-2020 |
| G58966_B | Двутавр балочный сварной по ГОСТ Р 58966-2020 |
| G58966_K | Двутавр колонный сварной по ГОСТ Р 58966-2020 |
| G58966_S | Двутавр свайный сварной по ГОСТ Р 58966-2020 |
| PDC_t1 | Двутавры сварные типа БС по РДС РК 5.04-24-2006 |
| PDC_t2 | Двутавры сварные типа ШС по РДС РК 5.04-24-2006 |
| PDC_t3 | Двутавры сварные типа КС по РДС РК 5.04-24-2006 |
| ***Список разделов индийского сортамента*** | |
| Equal | Равнополочный уголок |
| UnEqual | Неравнополочный уголок |
| ISHB | Двутавр ISHB |
| ISJB | Двутавр ISJB |
| ISLB | Двутавр ISLB |
| ISMB | Двутавр ISMB |
| ISWB | Двутавр ISWB |
| ISJC | Швеллер ISJC |
| ISLC | Швеллер ISLC |
| ISMC | Швеллер ISMC |
| Round | Труба круглая |
| ***Список разделов японского сортамента*** | |
| E_Angles | Равнополочный уголок по JIS G3192:1990 |
| V_Angles | Неравнополочный уголок |
| V2_Angles | Неравнополочный уголок 2 |
| SF_Shapes | Двутавр узкий по JIS G3192:1990 |
| MF_Shapes | Двутавр средний |
| WF_Shapes | Двутавр широкий по JIS G3192:1990 |
| Channel | Швеллер по JIS G3192:1990 |
| SF_Tee | Тавр узкий |
| MF_Tee | Тавр средний |
| WF_Tee | Тавр широкий |
| Pipe | Труба круглая |

| Имя раздела | Содержание |
|---|---|
| Rect_T | Труба прямоугольная |
| Square_T | Труба квадратная |
| ***Список разделов сортамента стальных оцинкованных канатов по ГОСТ*** | |
| T2-36_1 | Канат закрытый несущий с двумя слоями z-образной проволоки и сердечником типа ТК. ГОСТ 18901-73* |
| T2-37_1 | Канат двойной свивки типа ЛК-РО. ТУ 14-4-902-78 |
| T2-38_1 | Канат закрытый несущий с одним слоем z-образной проволоки и сердечником типа ТК. ГОСТ 3090-73* |
| T2-38_2 | Канат закрытый со слоем клиновидной и z-образной проволоки и сердечником типа ТК. ГОСТ 7675-73* |
| T2-38_3 | Канат закрытый со слоями клиновидной и z-образной проволоки и сердечником типа ТК. ГОСТ 7676-73* |
| T2-39_1 | Канаты стальные оцинкованные спиральные закрытой конструкции. ТУ 14-4-1216-82 |
| T2-40_1 | Канат одинарной свивки типа ЛК-О. ГОСТ 3062-80* |
| T2-40_2 | Канат одинарной свивки типа ТК. ГОСТ 3063-80* |
| T2-40_3 | Канат одинарной свивки типа Т12. ГОСТ 3064-80* |
| T2-40_4 | Канат двойной свивки типа ЛК-О. ГОСТ 3066-80* |
| T2-40_5 | Канат двойной свивки типа ЛК-3. ГОСТ 7667-80* |
| T2-40_6 | Канат стальной двойной свивки типа ДК-РО. ГОСТ 7669-80* |
| T2-41_1 | Канат двойной свивки типа ЛК-Р. ГОСТ 14954-80* |
| ***Список разделов сортамента арматурных стержней по ГОСТ*** | |
| A_1 | Арматура класса А-I по ГОСТ 5781-82* |
| A_2 | Арматура класса А-II по ГОСТ 5781-82* |
| A_3 | Арматура класса А-III по ГОСТ 5781-82* |
| A_4 | Арматура класса А-IV по ГОСТ 5781-82* |
| A_5 | Арматура класса А-V по ГОСТ 5781-82* |
| A_6 | Арматура класса А-VI по ГОСТ 5781-82* |
| At_7 | Арматура класса Ат-VII по ГОСТ 10884-81 |
| Bp_1 | Арматура класса Вр-I по ГОСТ 6727-80 |
| Bp_2 | Арматура класса Вр-II по ГОСТ 7348-81 |
| B_2 | Арматура класса В-II по ГОСТ 7348-81 |
| A400C | Арматура класса А400С по СТО АСЧМ 7-93 |
| A500C | Арматура класса А500С по СТО АСЧМ 7-93 |
| K_7 | Арматурные канаты класса К-7 по ГОСТ 13840-68 |
| K_19 | Арматурные канаты класса К-19 по ТУ 14-4-22-71 |
| ***Список разделов сортамента арматурных стержней Республики Беларусь*** | |
| S400-500 | Арматура классов S400, S500 по ТУ РБ 190266671.001-2002 |
| S400500 | Арматура классов S400, S500 по ТУ РБ 04778771.001-97 |
| S800 | Арматура класса S800 по ТУ РБ 04778771.001-97 |
| S500 | Арматура класса S500 по СТБ1341-2002 |
| ***Список разделов сортамента арматурных стержней по ENV 10080:1996*** | |
| B500A | Арматура класса B500A по ENV 10080:1996 |
| B500B | Арматура класса B500B по ENV 10080:1996 |
| B450C | Арматура класса B450C по ENV 10080:1996 |
| ***Сортамент Китая*** | |
| Equal | Уголок равнополочный GB/T 706-2008 |
| UnEqual | Уголок неравнополочный GB/T 706-2008 |
| Angle2T | Уголок неравнополочный тип II GB/T 706-2008 |
| Dtavr | Двутавр с уклоном полок GB/T 706-2008 |
| Channel | Швеллер с уклоном полок GB/T 706-2008 |
| Round | Круглые трубы по GB/T 6728-2002 |

| Имя раздела | Содержание |
|---|---|
| Square | Трубы стальные квадратные по GB/T 6728-2002 |
| Rectangl | Прямоугольные трубы по GB/T 6728-2002 |
| LEq_706 | Уголок равнополочный по GB/T 706-2016 |
| LUnE_706 | Уголок неравнополочный по GB/T 706-2016 |
| DU_706 | Двутавр с уклоном полок по GB/T 706-2016 |
| UU_706 | Швеллер с уклоном полок по GB/T 706-2016 |
| D_11263 | Двутавр с параллельными гранями полок GB/T 11263-2017 |
| T_11263 | Тавр с уклоном полок GB/T 11263-2017 |
| ***Сортамент Польши*** | |
| Angle_Eq | Равнополочный уголок по PN-EN 10056-1:2000 |
| Equal | Равнополочный уголок по PN-84/H-93401 |
| IPE | Балки двутавровые по PN-91/H-93419 |
| HEA | Двутавр HEA по PN-H-93452:2005 |
| HEB | Широкополочные двутавры по PN-H-93452:2005 |
| HEC | Двутавр HEC по PN-H-93452:2005 |
| Chanel | Швеллеры по PN-86/H-93403 |
| Tube_car | Труба квадратная PN-EN 10219-2:2000 |
| ***Термопрофили стальные гнутые*** | |
| CTO_TPGC | Профиль ТПГС по СТО 42481025 006-2007 |
| CTO_TPP | Профиль ТПП по СТО 42481025 006-2007 |
| ***Профили холодногнутые*** | |
| TU1121U | Профиль ЛП по ТУ 1121-009-46216359-2010 |
| TU1121S | Профиль ЛС по ТУ 1121-009-46216359-2010 |
| TU1122_U | Профиль U по ТУ 1122-002-10836231-2014 |
| TU1122_S | Профиль С по ТУ 1122-02-10836231-2014 |
| TU1120_U | Профиль U по ТУ 1120-001-37820873-2012 |
| TU1120_S | Профиль С по ТУ 1120-001-37820873-2012 |
| TU1120S | Профиль ПС по ТУ 1120-001-82861223-2009 |
| G8282_83 | Профиль стальной гнутый С-образный равнополочный по ГОСТ 8282-83 |
| Z13229N1 | Профили стальные гнутые зетовые ГОСТ 13229-78 табл.3 |
| Z13229N2 | Профили стальные гнутые зетовые ГОСТ 13229-78 табл.4 |
| Z13229R1 | Профили стальные гнутые зетовые ГОСТ 13229-78 табл.1 |
| Z13229R2 | Профили стальные гнутые зетовые ГОСТ 13229-78 табл.2 |
| G8281_T1 | Швеллер стальной гнутый неравнополочный по ГОСТ 8281-80 табл.1 |
| G8281_T2 | Швеллер стальной гнутый неравнополочный по ГОСТ 8281-80 табл.2 |
| G8283_T1 | Профиль стальной гнутый корытный равнополочный по ГОСТ 8283-93 табл.1 |
| G8283_T2 | Профиль стальной гнутый корытный равнополочный по ГОСТ 8283-93 табл.2 |
| TU1125S1 | Профиль ПС1 по ТУ 25.11-001-97638531-2017 |
| PP | Профиль ПП по ТУ 5285-004-4281025-04 |
| PS | Пофиль ПС по ТУ 5285-004-4281025-04 |
| PGS | Профиль ПГС по ТУ 5285-004-4281025-04 |
| PGS_E | Профиль ПГС_Е по ТУ 5285-004-4281025-04 |
| Z | Профиль Z по ТУ 5285-004-4281025-04 |
| L_b_25 | Уголок гнутый равнополочный по ТУ 25.11.23-001-00206227-2020 |
| L_Bxb_25 | Уголок неравнополочный гнутый по ТУ 25.11.23-001-00206227-2020 |
| PP_25 | Профиль ПП по ТУ 25.11.23-001-00206227-2020 |
| PGS_25 | Профиль ПГС по ТУ 25.11.23-001-00206227-2020 |
| PGS_E_25 | Профиль ПГС_Е по ТУ 25.11.23-001-00206227-2020 |
| PS_25 | Профиль ПС по ТУ 25.11.23-001-00206227-2020 |
| Z_25 | Профиль Z по ТУ 25.11.23-001-00206227-2020 |
| G8282_22 | Профиль стальной гнутый С-образный равнополочный по ГОСТ 8282-2022 |
| Sh_25 | Профиль ПШ по ТУ 25.11.23-00100206227-2020 |

| Имя раздела | Содержание |
|---|---|
| Sh | Профиль ПШ по ТУ 5285-004-4281025-04 |
| | ***Профили холодногнутые стальные оцинкованные*** |
| TU1121PC | Профиль ПС по ТУ 1121-001-13830080 |
| TU1121PH | Профиль ПН по ТУ 1121-001-13830080 |
| TU1121TC | Профиль ТС по ТУ 1121-001-13830080 |
| TU1121TH | Профиль ТН по ТУ 1121-001-13830080 |
| TU1122AC | Профиль АС по ТУ 1122-002-82866678-2013 |
| TU1121E1 | Профиль Е по ТУ 1121-001-99651760-2015 из сталей 250/С255 |
| TU1121E2 | Профиль Е по ТУ 1121-001-99651760-2015 из сталей 350/С345 |
| TU1122AE | Профиль АЕ по ТУ 1122-002-82866678-2013 |
| TU1122Z1 | Профиль AZ по ТУ 1122-002-82866678-2013 табл.2 |
| TU1122Z2 | Профиль AZ по ТУ 1122-002-82866678-2013 табл.3 |
| CTO_C250 | Профиль С-образный (сталь 250) по СТО 12447545-0012-2012 |
| CTO_C350 | Профиль С-образный (сталь 350) по СТО 12447545-0012-2012 |
| CTO_Z250 | Профили зетовые (сталь 250) по СТО 12447545-0012-2012 |
| CTO_Z350 | Профили зетовые (сталь 350) по СТО 12447545-0012-2012 |
| | ***Профили прессованные из алюминиевых сплавов*** |
| 13616_A | Профили прессованные прямоугольные из алюминия ГОСТ 13616-97 |
| 13616_M | Профили прессованные прямоугольные из магниевого сплава ГОСТ 13616-97 |
| 13618_A | Прессованные фитинговые уголки из алюминия ГОСТ 13618-97 |
| 13618_M | Прессованные фитинговые уголки из магния ГОСТ 13618-97 |
| 13619_A | Профили прессованные зетовые из алюминия ГОСТ 13619-97 |
| 13619_M | Профили прессованные зетовые из магния ГОСТ 13619-97 |
| 13620_A | Профили прессованные зетовые из алюминия ГОСТ 13620-90 |
| 13620_M | Профили прессованные зетовые из магния ГОСТ 13620-90 |
| 13621_A | Профили прессованные двутавровые из алюминия ГОСТ 13621-90 |
| 13621_M | Профили прессованные двутавровые из магния ГОСТ 13621-90 |
| 13622_A | Профили прессованные тавровые из алюминия ГОСТ 13622-91 |
| 13622_M | Профили прессованные тавровые из магния ГОСТ 13622-91 |
| 13623_A | Профили прессованные швеллерные из алюминия ГОСТ 13623-90 |
| 13623_M | Профили прессованные швеллерные из магния ГОСТ 13623-90 |
| 13624_A | Профили прессованные швеллерные (корытные) из алюминия ГОСТ 13624-90 |
| 13624_M | Профили прессованные швеллерные (корытные) из магния ГОСТ 13624-90 |
| 13737_A | Профили прессованные равнополочные уголки из алюминия ГОСТ 13737-90 |
| 13737_M | Профили прессованные равнополочные уголки из магния ГОСТ 13737-90 |
| 13738_A | Профили прессованные неравнополочные уголки из алюминия ГОСТ 13738-91 |
| 13738_M | Профили прессованные неравнополочные уголки из магния ГОСТ 13738-91 |
| 17576_A | Профили прессованные трапециевидные из алюминия ГОСТ 17576-97 |
| 17576_M | Профили прессованные трапециевидные из магния ГОСТ 17576-97 |
| 29303_A | Профили прессованные двутавровые неравнополочные из алюминия ГОСТ 29303-92 |
| 29303_M | Профили прессованные двутавровые неравнополочные из магния ГОСТ 29303-92 |
| КР18475 | Трубы прессованные круглые из алюминия ГОСТ 18475-82 |
| КВ18475 | Трубы прессованные квадратные из алюминия ГОСТ 18475-82 |
| R18475 | Трубы прессованные прямоугольные из алюминия ГОСТ 18475-82 |
| P56281 | Трубы прессованные круглые из алюминия ГОСТ Р 56281-2014 |
| 18482 | Трубы прессованные круглые из алюминия ГОСТ 18482-2018 |
| 23697 | Трубы сварные круглые из алюминия ГОСТ 23697-79 |
| 21488_NR | Прутки прессованные круглые из алюминия нормальной точности ГОСТ 21488-97 |
| 21488_PR | Прутки прессованные круглые из алюминия повышенной точности ГОСТ 21488-97 |
| 21488_HR | Прутки прессованные круглые из алюминия высокой точности ГОСТ 21488-97 |
| 21488_NS | Прутки прессованные квадратные из алюминия нормальной точности ГОСТ 21488-97 |
| 21488_PS | Прутки прессованные квадратные из алюминия повышенной точности ГОСТ 21488-97 |
| 21488_HS | Прутки прессованные квадратные из алюминия высокой точности ГОСТ 21488-97 |

| Имя раздела | Содержание |
|---|---|
| | ***Холодногнутые профили украинских производителей*** |
| Light_C | Профиль С-образный по Лайт Хаусе-Украина |
| Light_U | Профиль U-образный по Лайт Хаус-Украина |
| Stal_C | Профиль С-образный по Сталекс |
| Stal_Cw | Профиль Cw-образный по Сталекс |
| Stal_U | Профиль U-образный по Сталекс |
| Stal_Z | Профили стальные гнутые зетовые (Z) по Сталекс |
| Stal_Zw | Профили стальные гнутые зетовые (Zw) по Сталекс |
| tabl_C | Профиль С-образный Прушиньски |
| tabl_Z | Профили стальные гнутые зетовые по Прушиньски |
| | ***Холодногнутые профили RUUKKI*** |
| RUUKKI_H | Профиль стальной гнутый корытный равнополочный RUUKKI |
| RUUKKI_C | Профиль стальной гнутый С-образный RUUKKI |
| RUUKKI_E | Профиль стальной гнутый сигмавидный RUUKKI |
| RUUKKI_Z | Профиль стальной гнутый Z-образный RUUKKI |
| | ***Холодногнутые профили Прушиньски*** |
| Prusz_C | Профиль С-образный по Прушиньски |
| Prusz_E | Профили стальные гнутые сигмавидные по Прушиньски |
| Prusz_Z | Профили стальные гнутые зетовые по Прушиньски |
| | ***Украинский сортамент металлопроката*** |
| EQ_2251 | Уголок стальной горячекатаный равнополочный по ДСТУ 2251:2018 (сокращенный) |
| EQ2251P | Уголок стальной горячекатаный равнополочный по ДСТУ 2251:2018 |
| Ch_3436 | Швеллер стальной горячекатаный по ДСТУ 3436-96 (сокращенный) |
| Ch_3436P | Швеллер стальной горячекатаный по ДСТУ 3436-96 |
| Ch_3436E | Швеллеры экономичные с параллельными гранями полок по ДСТУ 3436-96 (ГОСТ 8240-97) |
| Ch_3436L | Швеллеры легкой серии с параллельными гранями полок по ДСТУ 3436-96 (ГОСТ 8240-97) |
| Ch_3436 | Швеллеры с параллельными гранями полок по ДСТУ 3436-96 (ГОСТ 8240-97) |
| Ch_3436U | Швеллеры с уклоном внутренних граней полок по ДСТУ 3436-96 (ГОСТ 8240-97) |
| DtM_8768 | Двутавр стальной горячекатаный специальный по ДСТУ 8768:2018 (сокращенный) |
| Dt_8768 | Двутавр стальной горячекатаный по ДСТУ 8768:2018 (сокращенный) |
| Dt_8768P | Двутавр стальной горячекатаный по ДСТУ 8768:2018 |
| Dweld_95 | Двутавры сварные по ТУ У 01412851.001-95 |
| Dweld_B | Двутавр сварной серии (Б) взамен ГОСТ 26020-83 (ТУ 0925-001-97638531-2016) |
| Dweld_K | Двутавр сварной серии (К) взамен ГОСТ 26020-83 (ТУ 0925-001-97638531-2016) |
| Dweld_Sh | Двутавр сварной серии (Ш) взамен ГОСТ 26020-83 (ТУ 0925-001-97638531-2016) |
| O_10704 | Трубы стальные электросварные прямошовные по ГОСТ 10704-91 (сокращенный) |
| O_10704P | Трубы электросварные прямошовные по ГОСТ 10704-91 |
| C10219 | Круглые трубы сварные по ГОСТ 10219-2:2009 |
| HSS_ENS | Квадратные трубы по EN 10219:2006 (сокращенный) |
| kv_tr82 | Трубы стальные квадратные по ГОСТ 8639-82 |
| OKV_8639 | Трубы стальные квадратные по ГОСТ 8639-82 (сокращенный) |
| OR_8645 | Прямоугольные стальные трубы по ГОСТ 8645-68 (сокращенный) |
| S10219 | Квадратные трубы сварные по EN 10219-2:2009 |
| tr8645 | Трубы стальные прямоугольные по ГОСТ 8645-68 |
| R10219 | Прямоугольные трубы сварные поEN 2019:2006 |
| RHS_EN | Прямоугольные трубы поEN 2019:2006 (сокращенный) |
| DST8540p | Прокат листовой горячекатаный по ДСТУ 8540:2015 (рулон) (сокращенный) |
| DSTU8540 | Прокат листовой горячекатаный по ДСТУ 8540:2015 (сокращенный) |
| DSTU8971 | Прокат листовой холоднокатаный по ДСТУ 8971:2019 (сокращенный) |
| DSTU8938 | Трубы стальные безшовные горячедеформированные по ДСТУ 8938:2019 |
| DST8940S | Трубы стальные профильные квадратные по ДСТУ 8940:2019 |

| Имя раздела | Содержание |
|---|---|
| DST8940R | Трубы стальные профильные прямоугольные по ДСТУ 8940:2019 |

## Соглашение об именах файлов в рабочем каталоге вычислительного комплекса SCAD

В таблице 1 приведены расширения для файлов с исходными данными, которые используются в вычислительном комплексе.

**Файлы исходных данных** **Таблица 1**

| Имя расширения | Содержание |
|---|---|
| **.spr** | Исходные данные проекта **SCAD** |
| **.vpr** | Исходные данные проекта **SCAD** с вариациями моделей |
| **.opr** | Исходные данные проекта типа **ФОРУМ** |
| **.mpr** | Исходные данные, описывающие возведение конструкции (**Монтаж**) |
| **.txt** | Исходные данные проекта **SCAD** в текстовом формате |
| **.sec** | Данные о сечениях, сформированных **Конструктором сечений** |
| **.cns, .con** | Данные о сечениях, сформированных конструктором сечений **Консул** |
| **.tns** | Данные о сечениях, сформированных конструктором сечений **ТОНУС** |
| **.crs** | Данные программы **Кросс** |
| **.spc** | Файлы с акселерограммами |
| **.spd** | Файлы со спектрами коэффициентов динамичности |
| **.thi** | Файл с функцией времени (для режима прямого интегрирования) |
| **.bak** | Файл с копией модели в состоянии перед последним сохранением данных на диске |
| **.AutoSave**<br>**.AutoSave1**<br>**.AutoSave2**<br>**...** | Файлы с копией данных, которые создаются при автосохранении |
| **.SCADModelColor** | Файл с данными о настройке цветовых шкал |
| **.SCADFilters** | Файл с настройками фильтров |
| **.SCADDocMaker** | Файл с данными для формирования отчета |
| **.SCADFonts** | Файл с настройками шрифтов |
| **.SCADMatrix** | Файл с данными о положении модели |

В процессе выполнения расчета в рабочий каталог (по умолчанию **SWORK**) записываются файлы, которые по виду содержащейся в них информации можно разделить на три группы:

- рабочие файлы (матрица жесткости и ее правые части, внутренние форматы конечных элементов и т. п.);
- результаты расчета (перемещения, усилия, формы колебаний и т. п.);
- результаты работы генератора таблиц в текстовом формате.

Первые две группы содержат файлы в двоичном формате, а третья — в текстовом.

Все файлы в рабочем каталоге идентифицируются именем файла задачи и трехсимвольным расширением, в котором первая буква **f** (см. таблицу 2) используется для двоичных файлов, а **p** — для текстовых файлов (см. таблицу 3).

Имена файлов необходимо знать для переноса задачи вместе с рабочими файлами на другой компьютер или для освобождения рабочего каталога от уже ненужных результатов. Очевидно, что всегда можно удалить файлы печати. При недостатке места на диске можно удалить и файл с матрицей жесткости (расширение **.f01**), который, как правило, имеет самый большой размер. При

этом остается доступным графический анализ результатов расчета, но режим продолжения расчета работать не будет.

При выводе графических файлов, формируемых операциями **Сохранение образа экрана** или **Сохранение видео с анимацией**, а также при создании документов для программ MS Word или MS Excel имена файлов задаются пользователем. Их расширения зависят от вида информации (**.wmf, .emf** — при сохранении образа экрана, **.avi** — видео файл, **.rtf** — при экспорте в MS Word, **.xls** — при экспорте в MS Excel).

**Двоичные файлы результатов** **Таблица 2**

| Расширения | Содержание |
|---|---|
| F00 | Внутренние форматы конечных элементов после контроля |
| F01 | Матрица жесткости |
| F02 | Рабочий файл для хранения промежуточных вычислений |
| F03 | Рабочий файл для хранения промежуточных вычислений |
| F04 | Собственные частоты колебаний<br>Формы колебаний<br>Инерционные нагрузки<br>Распределение весов масс |
| F05 | Фронтальный метод |
| F06 | Фронтальный метод. Вспомогательная информация. |
| F07 | Величины перемещений |
| F08 | Величины усилий |
| F10 | Расчетные сочетания<br>Унифицированные расчетные сочетания |
| F11 | Матрица жесткости для Ланцоша |
| F12 | Динамика для Ланцоша |
| F14 | Ускорения для динамических загружений |
| F15 | Ускорения точек |
| F16 | Коэффициенты запаса устойчивости<br>Формы потери устойчивости<br>Свободные длины элементов |
| F17 | Отсортированные перемещения |
| F19 | Главные и эквивалентные напряжения |
| F20 | Главные и эквивалентные напряжения от комбинаций загружений |
| F21 | Расчетные сочетания<br>Унифицированные расчетные сочетания |
| F22 | Новые РСУ для печати |
| F23 | Старые РСУ для печати |
| F24 | Правые части |
| F25 | Отсортированные перемещения |
| F28 | РСУ для прогрессирующего разрушения |
| F29 | Расчетные сочетания перемещений |
| F30 | Расчетные сочетания реакций в связях |
| F31 | Результаты работы нелинейного процессора, необходимые для работы постпроцессоров |
| F32, F33, F36 | Рабочие файлы нелинейного процессора |
| F34 | Рабочий файл вычисленных перемещений для нелинейного процессора |
| F35 | Рабочий файл данных предыдущей задачи |
| F39 | Результаты расчета в поспроцессоре «Огнестойкость» |
| F40 | Результаты расчета в поспроцессоре «Сталь» |
| F41 | Данные монтажа |
| F42 | Динамика монтажа |
| F43 | Деформации монтажа |
| F44 | Усилия монтажа |
| F45 | Вспомогательные результаты монтажа |

| Расширения | Содержание |
|---|---|
| F50 | Полиномы (рабочие файлы) |
| F51 | Энергия |
| F53 | Нагрузки от фрагмента схемы в связях от комбинаций загружений |
| F54 | Реакции в связях |
| F55 | От комбинаций загружений:<br>Коэффициенты запаса устойчивости<br>Формы потери устойчивости<br>Свободные длины элементов |
| F56 | Нагрузки от фрагмента схемы от комбинации загружений |
| F57 | Нагрузки от фрагмента схемы |
| F58 | Перемещения от комбинаций загружений |
| F59 | Усилия от комбинаций загружений |
| F60 | Расчетные сочетания прогибов |
| F67 | Результаты расчета на опрокидывание |
| F71 | Спектры ответа |
| F72 | АЧХ |
| F73 | |
| F81-F84 | Результаты интегрирования уравнений движения |
| F89 | Экспертиза анализа прогрессирующего разрушения деревянных элементов |
| F91 | Экспертиза стальных элементов |
| F92 | Экспертиза железобетонных элементов |
| F93 | Экспертиза прогрессирующего разрушения стальных элементов |
| F94 | Экспертиза прогрессирующего разрушения железобетонных элементов |
| F95 | Результаты подбора стали |
| F96 | Результаты подбора арматуры |
| F98 | Экспертиза деревянных элементов |

**Текстовые файлы результатов** **Таблица 3**

| Имя расширения | Содержание |
|---|---|
| P01 | Протокол расчета |
| P02 | Исходные данные |
| P03 | Ошибки в исходных данных |
| P04 | Служебная информация |
| P05 | Величины перемещений |
| P06 | Величины усилий |
| P07 | Величины реакций |
| P08 | Расчетные сочетания и унифицированные расчетные сочетания |
| P09 | Частоты собственных колебаний |
| P10 | Формы колебаний |
| P11 | Инерционные нагрузки |
| P12 | Суперэлементная структура |
| P13 | Сведения о состоянии материала |
| P14 | Главные и эквивалентные напряжения по усилиям |
| P15 | Главные и эквивалентные напряжения от комбинаций загружений |
| P16 | Пояснительная записка |
| P17 | Распределение весов масс |
| P18 | Коэффициенты запаса устойчивости |
| P19 | Свободные длины элементов |
| P20 | Формы потери устойчивости |
| P21 | Коэффициенты жесткости основания |
| P22 | От комбинаций загружений: величины усилий |
| P23 | От комбинаций загружений: величины перемещений |
| P24 | От комбинаций загружений: главные и эквивалентные напряжения |

| Имя расширения | Содержание |
|---|---|
| P25 | Реакции на фундамент |
| P26 | От комбинаций загружений: реакции на фундамент |
| P27 | От комбинаций загружений: коэффициенты запаса устойчивости |
| P28 | От комбинаций загружений: свободные длины элементов |
| P29 | От комбинаций загружений: формы потери устойчивости |
| P30 | Значения импульсов |
| P31 | Ускорения |
| P32 | РСУ |
| P33 | Реакции в связях |
| P34 | Реакции в связях от комбинаций загружений |
| P35 | Расчетные сочетания перемещений |
| P36 | Расчетные сочетания реакций в связях |
| P37 | РСУ прогрессирующего обрушения |
| P38 | Расчетные сочетания прогибов |
| P39 | Ускорения |
| P71,P72,P73 | Спектры ответа |
| P97-399 | Арматура |

## "Горячие" клавиши и контекстное меню

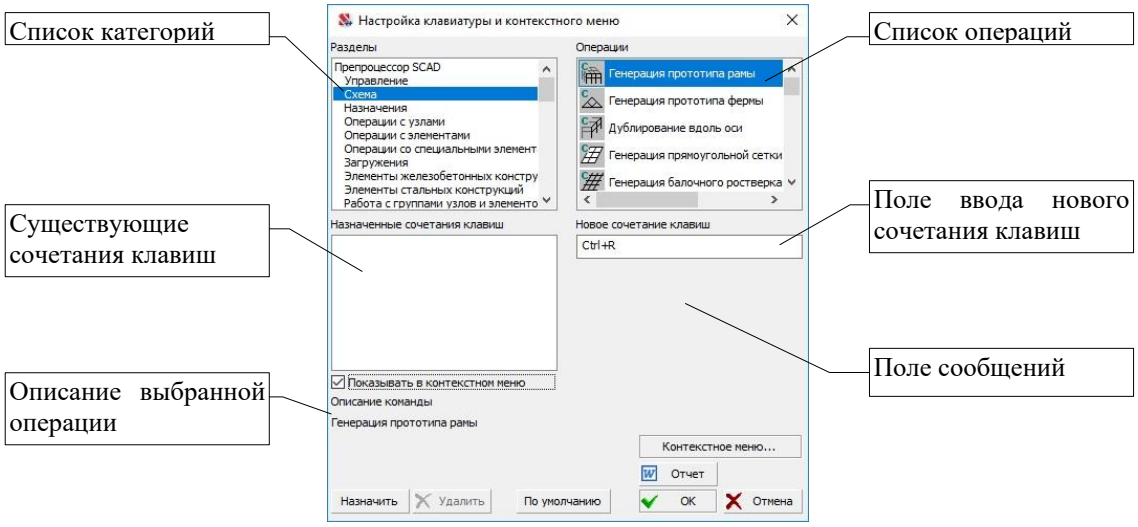
«Горячая клавиша» — эта некоторое сочетание клавиш, одновременное нажатие которых приводит к активации определенной операции или раздела меню. Ниже в таблице приведен используемый по умолчанию список "горячих" клавиш программы **SCAD++**.

| | | |
|---|---|---|
| Выполнить операцию |  | Enter |
| Отменить |  | Escape |
| Сохранить проект |  | Ctrl+S |
| Сохранить проект как… | | Ctrl+Shift+S |
| Открыть проект |  | Ctrl+O |
| Отменить последнюю операцию |  | Ctrl+Z |
| Вернуть последнюю отмененную операцию |  | Ctrl+Y или Ctrl+Shift+Z |
| Печать |  | Ctrl+P |
| Закрыть активный проект | | Ctrl+W |
| Выход в дерево проекта |  | Ctrl+T |
| Информация об элементе |  | Ctrl+Shift+F |
| Информация об узле |  | Ctrl+F |
| Удаление выбранных объектов |  | Delete |
| Справка |  | F1 |

Кроме того, предусмотрена возможность создания и изменения собственных наборов горячих клавиш для подавляющего большинства операций, реализованных в пре- и постпроцессоре **SCAD**. Горячие клавиши можно многократно переназначать, включая и те, которые были определены при инсталляции. В целом, для программы **SCAD** действуют те же правила назначения горячих клавиш, что и для любого Windows-приложения. Например, в качестве префикса (первых клавиш в комбинации) может использоваться одна или несколько клавиш-модификаторов — Ctrl, Alt или

Shift. Кроме того, одна операция может вызываться с помощью нескольких наборов горячих клавиш.

Для создания и корректировки наборов горячих клавиш используется диалоговое окно **Настройка клавиатуры**, которое вызывается из одноименного пункта меню **Настройки**.




*Диалоговое окно*
**Настройки клавиатуры и контекстного меню**

При создании нового сочетания горячих клавиш следует:

- вызвать диалоговое окно **Настройка клавиатуры и контекстного меню**;
- в списке **Разделы** выбрать наименование инструментальной панели, панели фильтров или меню, к которому относится операция;
- отметить искомую операцию (если этой операции уже назначены горячие клавиши, то они будут показаны в поле **Назначенные сочетания клавиш**);
- установить курсор в поле **Новое сочетание клавиш**;
- нажать клавиши, составляющие сочетание;
- зафиксировать введенное нажатием кнопки **Назначить**.

Для замены ранее заданного сочетания следует ввести новый набор клавиш по приведенным выше правилам, а затем удалить предыдущее. Для удаления достаточно отметить сочетание в поле **Назначенные сочетания клавиш** и нажать кнопку **Удалить** в диалоговом окне.

Если новое сочетание клавиш уже было использовано для вызова другой операции, то сообщение об этом появится в поле сообщений диалогового окна.

Кнопка **По умолчанию** устанавливает набор горячих клавиш в описанное выше состояние по умолчанию. Кнопка **Отчет** создает документ со списком всех назначенных горячих клавиш.

Некоторые команды повторяются в нескольких инструментальных панелях (например, команда *Отображение расчетной схемы*). Такие команды показаны в списке на розовом фоне. Настройка горячих клавиш для таких команд автоматически приводит к их настройке во всех инструментальных панелях.

Кнопки вызова некоторых часто используемых операций можно продублировать в контекстном меню, которое появляется по нажатию правой кнопки мыши. Операции в этом меню группируются независимо от того, к какой группе команд они относятся, и главное, что их объединяет, — это быстрый доступ без обращения к инструментальным панелям и панелям фильтров («все на одном столе»).

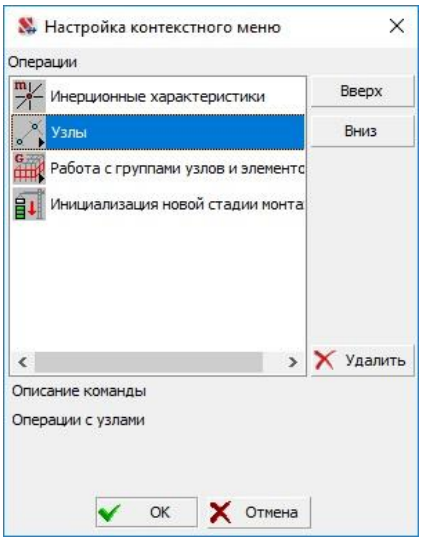
При создании и корректировке контекстного меню используется упомянутое выше диалоговое окно **Настройка клавиатуры и контекстного меню**.

Для размещения кнопки вызова операции в меню следует выполнить следующие действия:

- вызвать диалоговое окно **Настройка клавиатуры и контекстного меню**;
- в списке **Разделы** выбрать наименование инструментальной панели, панели фильтров или меню, к которому относится операция;

- в списке **Операции** отметить строку с наименованием нужной операции;
- активировать маркер **Поместить в контекстное меню**;
- повторить указанные действия, если необходимо разместить в меню другие кнопки.

Для настройки меню (удаления кнопок или изменения порядка их следования) используется одноименное диалоговое окно, которое вызывается нажатием кнопки **Контекстное меню…** Изменение порядка следования операций выполняется кнопками **Вверх**/**Вниз**, а удаление операции из меню — кнопкой **Удалить**.




*Диалоговое окно*
**Настройка контекстного меню**

Набор операций, доступных из контекстного меню, зависит от режима работы программы. Например, при работе в постпроцессоре из меню будут автоматически исключены команды, присущие только препроцессору.

Информация о горячих клавишах сохраняется в файле "%systemdrive%\users\All Users\SCAD Soft\SCADACCEL.tbl". Если возникла необходимость перенести настройки на другой компьютер, то достаточно скопировать данный файл (при копировании программа **SCAD++** должна быть закрыта).

Информация о настройках контекстного меню (и настройках диалоговых окон **Информация об узле**, **Информация об Элементе**) сохраняется в файле "%systemdrive%\users\All Users\SCAD Soft\SCADContextMenu.cfg". Если возникла необходимость перенести настройки на другой компьютер, то достаточно скопировать данный файл (при копировании программа **SCAD++** должна быть закрыта).

# Предметный указатель

Раздел **Предметный указатель** создан с целью помочь пользователю ориентироваться в книге не только по оглавлению, а и с помощью этого раздела, заменяющего возможный при наличии электронной, а не печатной версии текста *контекстный поиск*. Поэтому на соответствующих страницах вы найдете *упоминание* указанных терминов, понятий, но не их определение.


## А

абсолютно жесткие вставки, задание ..... 305
акселерограммы, подготовка файлов ..... 857
амплитудно-частотная характеристика, АЧХ ..... 851
анализ усилий, графический ..... 542
анализ устойчивости ..... 588, 806
анизотропное тело ..... 94
армирование ..... 647

## Б

балка, препроцессор ФОРУМ ..... 412
блок, препроцессор ФОРУМ ..... 409
блоки (группы объектов), препроцессор ФОРУМ ..... 402

## В

вантовые элементы ..... 829
вантовых систем расчет ..... 829
вариация моделей ..... 618
ввод, абсолютно твердое тело ..... 278
ввод, твердое тело ..... 278
вес собственный, задание ..... 324
веса масс, динамические воздействия ..... 349
ветровая нагрузка, теоретические основы ..... 43
визуализация, функции инструментальной панели ..... 451
выбрать, отметить, маркировать ..... 256

## Г

гармонические колебания, задание характеристик динамических воздействий ..... 396
гармоническое возбуждение, теоретические основы ..... 47
генерация конечноэлементной модели, препроцессор ФОРУМ ..... 438
геометрическая изменяемость ..... 24
геометрическая нелинейность ..... 827
геометрические преобразования, формирование расчетной схемы ..... 226
главные и эквивалентные напряжения ..... 817
группы ..... 10
группы нагрузок, создание ..... 343
группы узлов и элементов, создание ..... 280
группы узлов и элементов, фильтры отображения ..... 492
группы унификации ..... 734
группы элементов, формирование, постпроцессоры ..... 552
группы, подсхемы, суперэлементы ..... 25

## Д

динамическая задача, теоретические основы ..... 38
динамические воздействия, задание данных ..... 349, 352
динамические воздействия, теоретические основы ..... 43

## Е

единицы измерения, калькулятор преобразования, сервисные функции ..... 897

## Ж

жесткие вставки ..... 89
жесткие вставки, задание ..... 305
жесткие вставки, фильтры отображения ..... 477
жесткое (твердое) ..... 28
жесткое тело (твердое тело), ввод и назначение параметров ..... 278
жесткости, корректировка ..... 293, 296, 297, 299, 300
жесткостные характеристики, язык архивации данных ..... 876
жесткость элемента, корректировка ..... 480

## З

загружения динамические, язык архивации данных ..... 886
загружения, задание ..... 323
законтурные элементы плиты, ввод ..... 275

## И

изолинии, изополя, фильтры отображения ..... 496
изотропное тело ..... 93, 107, 112
импульс, удар, задание характеристик динамических воздействий ..... 393
импульсные нагрузки, теоретические основы ..... 46
информация об элементе, фильтры отображения ..... 479

## К

калькулятор для расчета по формулам, сервисные функции ..... 896
карта распределенных нагрузок, фильтры отображения ..... 485
карта узловых нагрузок, фильтры отображения ..... 486
комбинации загружений ..... 623
конечные элементы, визуализация атрибутов ..... 471
конструктивный элемент, геометрическая длина ..... 654, 715, 765
конус, формирование расчетной схемы ..... 190
координационные (разбивочные) оси, фильтры отображения ..... 487
копирование схемы, формирование расчетной схемы ..... 222
копирование фрагмента, формирование расчетной схемы ..... 225
коэффициент запаса устойчивости ..... 807
коэффициенты постели, коэффициенты упругого основания ..... 88, 95, 313

коэффициенты постели, коэффициенты упругого основания, связь с программой КРОСС ..... 319
крен здания, вычисление ..... 535
критерии определения РСУ (мембраны) ..... 628
критерии определения РСУ (оболочки)..... 629
критерии определения РСУ (стержни) ..... 627, 629

## Л

линейная статическая задача ..... 26
линии невидимого контура, фильтры отображения ... 490

## М

массы, язык архивации данных ..... 886
масштаб отображения деформаций, эпюр, графический анализ..... 528
масштабирование, формирование расчетной схемы .. 227
металл, подсистема проверки несущей способности сечений из металлопроката..... 714
метод перемещений..... 21
монтаж, теоретические основы ..... 54

## Н

нагрузка на фундамент, нагрузка от фрагмента схемы .. 792
нагрузка на элемент, корректировка..... 480
нагрузки на элемент, цветовая индикация количества, фильтры отображения ..... 486
нагрузки от фрагмента схемы, анализ результатов .... 795
нагрузки, задание..... 323
нагрузки, фильтры отображения..... 483
направление выдачи усилий в пластинчатых элементах, фильтры отображения ..... 479
настройка графической среды ..... 499
настройка фильтров отображения информации ..... 472
нелинейная задача ..... 21
нелинейность, нелинейный расчет..... 826
нелинейный расчет, шаговый метод ..... 846
нуль-элемент, ввод ..... 272

## О

оболочки, назначение типа элемента, учет сдвига, учет геометрической нелинейности ..... 304
объединение перемещений..... 69, 317
объединение перемещений, фильтры отображения ... 468
объемные элементы..... 107
объемные элементы, формирование расчетной схемы ..... 226
односторонние связи..... 831
односторонние связи, ввод ..... 276
ортотропное тело..... 93, 112
оси местные элементов, фильтры отображения..... 478
оси общей системы координат, фильтры отображения ..... 487
оси ортотропии, задание осей вычисления напряжений ..... 311
отмена операции ..... 146

## П

пакет моделей..... 618
перемещения, результаты расчета..... 562
перемещения, фильтры отображения..... 485
перенос элементов из одного блока в другой, препроцессор ФОРУМ ..... 415
перенос, формирование расчетной схемы ..... 227
пластины треугольные, формирование сетки элементов ..... 206
пластины, добавление ..... 252
плоские конечные элементы..... 95
поверхность вращения, заданная аналитически, формирование ..... 192
поверхность вращения, формирование..... 187
поверхность, заданная аналитически, формирование 196
поворот, формирование расчетной схемы..... 227
поворот, функции панели Визуализация ..... 451
подбор стальных сечений..... 761
постпроцессоры, анализ результатов работы ..... 550
признак, тип схемы, системы..... 23, 76
проверка несущей способности деревянных сечений 764
прогибы, графический анализ..... 533
прогибы, фильтры отображения..... 495
прогрессирующее обрушение..... 797
проемы для окон, дверей,отверстия, препроцессор ФОРУМ..... 426
произвольные сечения, задание характеристик ..... 290
промежуточные сечения, задание ..... 309
прямое интегрирование уравнений движения, теоретические основы..... 48

## Р

размерные линии, фильтры отображения..... 490
рама, формирование расчетной схемы..... 174
расстояние между узлами, фильтры отображения..... 468
расчет по акселерограмме, теоретические основы ..... 47
расчетные сочетания усилий (РСУ) ..... 52
РСУ, расчетные сочетания усилий, армирование ..... 647

## С

сборка схемы из подсхем ..... 219
связи..... 23
связи, язык архивации данных..... 875
связь ВК SCAD с другими системами ..... 9
сейсмика, теоретические основы..... 45
сейсмическое воздействие, задание данных..... 361
сечения промежуточные, задание ..... 309
собственный вес, задание..... 324
сопряжение элементов с узлами системы..... 24

сортамент металлопроката, задание характеристик элементов ... 288, 293
специальные конечные элементы ... 122, 579
стена, препроцессор ФОРУМ ... 412
степени свободы, линейные перемещения, углы поворота ... 23
стержней добавление с учетом промежуточных узлов ... 257
стержней дробление ... 258
стержней разбивка с учетом промежуточных узлов ... 264
стержни по дуге окружности, ввод ... 259
стержни, объединить два стержневых элемента ... 258
структура ВК SCAD ... 7
сфера, формирование расчетной схемы ... 191
сходимость ... 58

## Т

трансверсально-изотропное тело ... 112
твердое (жесткое) ... 28
твердое тело (жесткое тело), ввод и назначение параметров ... 278
тело анизотропное ... 94
тело изотропное ... 93
тело ортотропное ... 93
тело трансверсально-изотропное ... 93
тело, изотропное тело ... 107, 112
тело, ортотропное тело ... 112
тело, трансверсально-изотропное тело ... 112
тело, трансверсально-изотропное и ортотропное тело ... 107
температурные нагрузки, отображение ... 484
тор, формирование расчетной схемы ... 192
точность (вычислений, решения собственной проблемы, разложения матрицы и т.п.) ... 506
трансверсально-изотропное и ортотропное тело ... 107
трансверсально-изотропное тело ... 93
триангуляция, формирование расчетной схемы ... 206

## У

увеличение изображения, функции панели Визуализация ... 457
угол разворота конструктивных осей (чистого вращения, ориентации главных осей инерции) ... 81
удаление узлов ... 241
узлов номера, фильтры отображения ... 465
узлы совпадающие, фильтры отображения ... 466
узлы удаленные, фильтры отображения ... 466, 474
узлы, ввод узлов на пересечениях разбивочных осей ... 246
узлы, восстановление удаленных ... 241
узлы, задание, язык архивации данных ... 875
узлы, замена узла в элементах ... 246
узлы, объединение узлов с совпадающими координатами, операции с узлами ... 244
узлы, фильтры отображения ... 466
унификация, раздел РСУ ... 638
упругое основание, моделирование расчета конструкции, теоретические основы ... 70
усилия (напряжения), результаты расчета ... 565
усилия в КЭ плит, правила чтения результатов расчета ... 575
усилия в объемных элементах, правила чтения результатов расчета ... 576
усилия в специальных КЭ, результаты расчета ... 579
усилия в стержнях, правила чтения результатов расчета ... 566
устойчивость равновесия ... 815
устойчивость равновесия, теоретические основы ... 50
устойчивость, анализ схемы расчета ... 806

## Ф

фильтры отображения информации ... 461
формулы математические, правила ввода, задание поверхности ... 194
фрагмент, функции панели Визуализация ... 454
фундамент, расчет нагрузок от фрагмента схемы ... 792

## Ц

цветовое представление результатов расчета ... 147
центр масс ... 534
цилиндр, формирование расчетной схемы ... 189

## Ч

численное описание типа жесткости ... 288

## Э

экспорт данных ... 902
экспорт модели из препроцессора ФОРУМ в расчетный комплекс SCAD ... 437
элементов номера, фильтры отображения ... 473
элементов удаленных восстановление ... 257
элементы многослойные, тип 71–74, 81–84 ... 121
элементы оболочки ... 100
элементы оболочки, назначение типа, учет сдвига, учет геометрической нелинейности ... 304
элементы объемные, добавление ... 255
элементы объемные, типы 31, 32, 33, 34, 36, 37, пространственная задача ... 108
элементы плоские, типы 11–15, 19, 20, балок-стенок, тонких плит, пологих оболочек ... 95
элементы совпадающие, фильтры отображения ... 474
элементы специальные, тип 51–55, 154, 200 ... 122
элементы стержневые, типы 1–7, 10 ... 83
элементы, объединение совпадающих ... 260
элементы, разделение элементов ... 263
элементы, фильтры отображения ... 472
энергетический постпроцессор ... 815

# Нормативная литература

Государственные строительные нормы Азербайджанской республики .Az. DTN 2.3-1 Строительство в сейсмических районах. – Баку: 2010. – 66 с.

Державні будівельні норми України. Будівництво у сейсмічних районах України. ДБН В.1.1-12:2006. – К.: Міністерство будівництва, архітектури та ЖКГ України, 2006. – 84 с.

Державні будівельні норми України. Будівництво у сейсмічних районах України. ДБН В.1.1-12:2014. – К.: Міністерство будівництва, архітектури та ЖКГ України, 2014. – 110 с.

ИЗМЕНЕНИЕ N 1 к СП 14.13330.2018 "СНиП II-7-81* Строительство в сейсмических районах". – URL: https://docs.cntd.ru/document/564509554

ИЗМЕНЕНИЕ N 2 к СП 14.13330.2018 "СНиП II-7-81* Строительство в сейсмических районах". – URL: https://docs.cntd.ru/document/728350349

МГСН. Многофункциональные здания и комплексы / Правительство Москвы.— М.: 1994.

Международные строительные нормы СНГ. Строительство в сейсмических районах. (Проект), 2002г. — Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2002, № 3, с. 27-54

НП-031-01 Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций. — Москва. —Госатомнадзор России. — 2001г. — 31 С.

Нормы Кыргызской Республики СН КР 20-02:2018 Сейсмостойкое строительство. Нормы проектирования. – Бишкек, 2009. – 104 с.

Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций. НП-031-01. Госатомнадзор России. — Вестник Госатомнадзора России. 2001, №6, с.7-31.

НТП РК 08-01.7-2017. Проектирование сейсмостойких зданий и сооружений. Часть. Общие положения. Сейсмические воздействия. – Астана: 2017. – 95 с.

НТП РК 08-01.7-2021 (к СП РК EN 1998-1:2004/2012) Проектирование сейсмостойких зданий. Часть: Проектирование гражданских зданий. Общие требования. – 98 с.

Пособие по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из тяжелых и легких бетонов без предварительного напряжения арматуры (к СНиП 2.03.01–84*) / ЦНИИпромзданий Госстроя СССР, НИИЖБ Госстроя СССР.— М.: Стройиздат, 1986.

Правила проектирования жилых и общественных зданий для строительства в сейсмических районах. СП 31-114-2004. –М.: ФГУП ЦПП, 2005. – 41 с.

Рекомендации по защите жилых каркасных зданий при чрезвычайных ситуациях / Москомархитектура. – М.: ГУП НИАЦ, 2002.– 24 с.

СНиП 2.02.01-83*. Основания зданий и сооружений. — М.: Стройиздат, 1984.

СНиП 2.01.07-85*. Нагрузки и воздействия. Строительные нормы и правила / Госстрой России.— М.: ГУП ЦПП, 2001. — 44 с.

СНиП II-7-81*. Строительство в сейсмических районах/Минстрой России. — М.: ГП ЦПП, 1996. — 52 с.

СНиП II-7-81*. Строительство в сейсмических районах/Госстрой России. — М.: ГУП ЦПП, 2000. — 44 с. + прил. 2 Ж 10 карт.

СНиП 2.03.01-84*. Бетонные и железобетонные конструкции. — М., Стройиздат, 1985.

СНиП II-7-81*. Строительство в сейсмических районах. — М., Стройиздат, 1982.

СП 14.13330.2011. Строительство в сейсмических районах (Актуализированная версия СНиП II-7-81*) М.: 2010. — 91 с.

СП 14.13330.2014. Строительство в сейсмических районах (Актуализированная версия СНиП II-7-81*) М.: 2014. — 126 с.

СП 14.13330.2014. Строительство в сейсмических районах (Актуализированная версия СНиП II-7-81*) М.:, 2014. — 126 с.

СП 14.13330.2018. Строительство в сейсмических районах Актуализированная версия СНиП II-7-81*. М.– Стандартинформ, 2018. – 116 с.

СП 20.13330.2011. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*. М. –2011. – 81 с.

СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85* (с Изменениями N 1, 2, 3). URL: https://docs.cntd.ru/document/456044318.

СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85* (с Изменениями N 1, 2, 3) / Свод правил от 03 декабря 2016 г.

СП 296.1325800.2017 Здания и сооружения. Особые воздействия. — М.: 2017. — 27 с.

СП 358.1325800.2017. Сооружения гидротехнические. Правила проектирования в сейсмических районах. М.: 2018. – 36 с.

СП 385.1325800.2018 Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения.

Строительные нормы республики Армения. Сейсмостойкое строительство. Нормы проектирования. СНРА II-2.02-94. – Ереван: 1994.

Строительные нормы республики Армения. Сейсмостойкое строительство. Нормы проектирования. СНРА II-6.02-2006. – Ереван: 2006.

Строительные нормы и правила республики Казахстан. СНиП в.1.2-4-98. Строительство в сейсмических районах. – Алматы: 1998. – 41с.

Строительные нормы республики и правила республики Казахстан. СНиП РК 2.03-30-2006. Строительство в сейсмических районах. – Астана, 2006. – 74с.

Строительные нормы и правила республики Казахстан. СНиП РК 2.03-30-2017* Строительство в сейсмических районах. – Астана: АО «КазНИИСА», 2018. – 74 с.

Строительные нормы Туркменистана. СНТ 2.01.08-99 Строительство в сейсмических районах. – Ашхабад, 2000.

Строительные нормы и правила Республики Таджикистан. СНиП РТ 22-07-2018 Сейсмостойкое строительство. – Душанбе: Комитет по архитектуре и строительству, 2019. – 48 с.

Строительные нормы и правила Республики Узбекистан. КМК 2.01.03-96 Строительство в сейсмических районах. – Ташкент: Госкомархитектстрой РУз, 1976. – 103 с.

Строительные нормы и правила Республики Узбекистан. КМК 2.01.03-19 Строительство в сейсмических районах. Ташкент. – Минстрой РУз, 2019. – 111 с.

EN 1990 (2002) (English): Eurocode - Basis of structural. design [Authority: The European Union Per Regulation. 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC]. – 116 p.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

**ПРЕДИСЛОВИЕ** ..... **3**

**1. СИСТЕМА SCAD OFFICE** ..... **5**
1.1.Вычислительный комплекс Structure CAD ..... 6
Проект ..... 6
Функциональные модули ..... 7
Процессор и библиотека конечных элементов ..... 7
Графические средства формирования расчетной схемы ..... 9
Укрупненные расчетные модели и связь с другими системами ..... 9
Группы ..... 10
Фильтры ..... 10
Графический постпроцессор ..... 11
Документирование результатов ..... 11
1.2.Проектно-аналитические программы ..... 11
Программа Кристалл ..... 11
Программа Камин ..... 12
Программа АРБАТ ..... 13
Программа Декор ..... 14
Программа ЗАПРОС ..... 15
1.3.Проектно-конструкторские программы ..... 15
Программа Монолит ..... 15
Программа КОМЕТА ..... 16
1.4.Вспомогательные программы ..... 16
Программа Конструктор сечений ..... 16
Программа Консул ..... 16
Программа ТОНУС ..... 17
Программа СЕЗАМ ..... 17
Программа ВеСТ ..... 18
Программа Откос ..... 18
Программа Кросс ..... 18
1.5.Сервисные функции ..... 19

**2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ** ..... **20**
2.1.Конструкция и ее расчетная схема ..... 20
Общие сведения ..... 20
Расчетная схема метода перемещений ..... 21
Основные и дополнительные неизвестные ..... 23
Внешние и внутренние связи ..... 23
Условия сопряжения элементов с узлами системы ..... 24
Группы, подсхемы, суперэлементы ..... 25
Нагрузки и воздействия ..... 25
2.2.Основные соотношения метода конечных элементов ..... 26
Линейная статическая задача ..... 26
Учет дополнительных связей ..... 28
Жесткие тела ..... 28
Депланация тонкостенных стержней ..... 31
Литература к разделу Депланация тонкостенных стержней ..... 38
Динамическая задача ..... 38
Об учете демпфирования ..... 40
2.3.Решение систем уравнений ..... 41
2.4.Стандартные случаи динамического загружения ..... 43
Ветровая нагрузка ..... 43
Сейсмика ..... 45
Импульсные нагрузки ..... 46
Гармоническое возбуждение ..... 47
Расчет по акселерограмме ..... 47
Прямое интегрирование уравнений движения ..... 48

2.5.Устойчивость равновесия ... 50
Разрешающие уравнения ... 50
Однопараметрическое загружение ... 50
Роль отдельных подсистем ... 51
2.6.Расчетные сочетания усилий (РСУ) ... 52
Стержни ... 53
Мембраны (плоское напряженное состояние) ... 54
Плиты ... 54
Оболочки ... 54
Загружения ... 54
2.7.Учет последовательности монтажа ... 54
Элементарные операции ... 55
Соглашение о нагрузках ... 56
Варианты модификации схемы ... 56
Конечно-элементные процедуры ... 57
2.8.Построение конечно-элементных моделей ... 58
Сходимость МКЭ ... 58
Проверка сходимости для некоторых моделей ... 60
Обход особых точек ... 63
Фрагментация ... 64
Парирование изменяемости ... 64
Стыковка элементов различной размерности ... 66
Эффекты объединения перемещений ... 69
Использование законтурных элементов упругого основания ... 70
Использование бесконечно жестких вставок ... 71
2.9.Литература к главе Теоретические Основы ... 73

**3. БИБЛИОТЕКА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ... 75**
3.1.Общие вопросы ... 75
3.2.Состав библиотеки конечных элементов ... 76
3.3.Стержневые элементы ... 79
Местные системы координат стержня ... 79
Общее описание стержневых конечных элементов ... 82
Виды стержневых конечных элементов ... 83
Особенности задания исходной информации для стержневых конечных элементов ... 84
Нагрузки на стержневые элементы ... 89
3.4.Плоские конечные элементы для расчета балок-стенок, тонких плит и пологих оболочек ... 92
Класс решаемых задач ... 92
Материал конструкций ... 93
Пластины Рейсснера-Миндлина ... 94
Учет упругого основания ... 95
Местные системы координат ... 95
Виды плоских конечных элементов ... 95
Особенности задания исходной информации для плоских конечных элементов ... 101
Нагрузки на плоские конечные элементы ... 102
3.5.Конечные элементы для решения пространственной задачи теории упругости (объемные элементы). 107
Общие сведения ... 107
Местные системы координат ... 108
Набор конечных элементов ... 108
Особенности задания исходной информации для объемных конечных элементов ... 109
Нагрузки на объемные конечные элементы ... 109
3.6.Универсальные конечные элементы для решения осесимметричной задачи теории упругости ... 111
Общие сведения ... 111
Набор конечных элементов ... 112
Особенности задания исходной информации для осесимметричных конечных элементов ... 114
Местные нагрузки ... 114
3.7.Конечные элементы для расчета кусочно-неоднородных по толщине (многослойных) пластин и пологих оболочек ... 116
Назначение конечных элементов ... 116

Исходные соотношения модели, учитывающей поперечный сдвиг, обжатие слоев и кривизну ..... 117
Исходные соотношения модели, учитывающей межслоевые сдвиги и кривизну ..... 119
Многослойные элементы в составе библиотеки КЭ ..... 121
Особенности задания исходной информации для многослойных конечных элементов ..... 122
Местные нагрузки ..... 122
3.8.Специальные конечные элементы ..... 122
«Нуль-элемент» общего вида (тип КЭ — 154) ..... 124
КЭ, моделирующий связи конечной жесткости (тип КЭ — 51) ..... 125
Законтурный двухузловой КЭ упругого основания (тип КЭ — 53) ..... 125
Законтурный одноузловой КЭ упругого основания (тип КЭ — 54) ..... 125
КЭ, моделирующий упругую связь между узлами (тип КЭ — 55) ..... 126
КЭ, моделирующий работу внешнего узлового демпфера (тип КЭ — 56) ..... 126
КЭ, моделирующий работу межузлового демпфера (тип КЭ — 57) ..... 126
Жесткое тело (тип КЭ – 100) ..... 128
Псевдоэлемент, предназначенный для моделирования элементов, исключенных из расчетной схемы (тип КЭ — 200) ..... 128
3.9.Литература к главе Библиотека Конечных Элементов ..... 128

**4. STRUCTURE CAD «НЕ ТОЛЬКО ДЛЯ ОРЛОВ» ..... 132**
4.1.Организация графической среды ..... 133
Меню ..... 133
Инструментальные панели ..... 135
Пиктограммы ..... 136
Кнопки с дополнительными возможностями ..... 136
Графики ..... 137
Фильтры ..... 137
Окна ..... 139
Мышь ..... 140
Курсоры ..... 140
Диалоговые окна ..... 141
Работа с таблицами ..... 142
Табличное представление данных и результатов ..... 143
Список сообщений ..... 145
4.2.Отмена и повтор операций ..... 146
4.3.Цветовые шкалы ..... 147
Управление интервальными цветовыми шкалами ..... 147
4.4.Решение простейшей задачи ..... 151
Загрузка комплекса ..... 151
Создание нового проекта ..... 152
Раздел «Управление» инструментальной панели препроцессора ..... 154
Формирование расчетной схемы, расчет и анализ результатов ..... 155
4.5.Расчет ..... 161
4.6.Графический анализ результатов расчета ..... 164
Анализ перемещений ..... 165
Анализ усилий ..... 165
4.7.Формирование расчетной схемы из двумерных элементов ..... 166
Назначение условий опирания ..... 168
Задание нагрузок ..... 168
Графический анализ результатов расчета ..... 170
4.8.ТАКИМ ОБРАЗОМ … ..... 171

**5. СОЗДАНИЕ РАСЧЕТНОЙ СХЕМЫ ..... 173**
5.1.Расчетные схемы рамных стержневых конструкций ..... 174
Операция Генерация прототипа рамы ..... 174
Многоэтажные многопролетные рамы ..... 174
Одноэтажные многопролетные рамы промышленных зданий ..... 176
Однопролетные рамы из двутавров переменного сечения ..... 178
5.2.Формирование схем плоских шарнирно-стержневых систем ..... 180
Генерация прототипа стальной фермы ..... 180
Работа на странице Сечения (дополнительные возможности) ..... 182

Генерация прототипа деревянной фермы ... 183
Генерация ферм с элементами произвольного сечения ... 183
5.3.Пространственные рамы и фермы ... 183
5.4.Формирование расчетной схемы балочного ростверка ... 184
5.5.Формирование прямоугольной сетки конечных элементов на плоскости ... 185
5.6.Поверхности вращения ... 187
Описание параметрических прототипов поверхностей вращения ... 189
5.7.Формирование поверхности вращения, заданной аналитически ... 192
Правила ввода математических формул ... 194
Пример. Отражатель радиотелескопа ... 195
Пример. Винтовой пандус ... 195
5.8.Формирование поверхности, заданной аналитически ... 195
Пример. Оболочка (параболоид вращения) ... 196
5.9.Формирование параметрических поверхностей ... 196
Примеры формирования расчетных моделей с использованием операции генерации параметрических поверхностей ... 198
5.10.Создание стандартной аналитической поверхности ... 200
5.11.Создание стандартных конструкций ... 202
5.12.Формирование произвольной сетки конечных элементов на плоскости ... 206
Основные положения ... 206
Ввод контура триангуляции ... 207
Преобразование стержней в контур триангуляции ... 209
Преобразование выпуклой оболочки отмеченных узлов в контур триангуляции ... 210
Превращение укрупненных элементов (объектов) в контур триангуляции ... 210
Параметры триангуляции ... 211
Некоторые «тонкости» ... 212
Сгущение сетки ... 213
Оценка качества триангуляции ... 217
Повышение качества триангуляции ... 218
Экспорт контура триангуляции в программу GMSH ... 218
5.13.Сборка схемы из нескольких схем ... 218
Способы сборки ... 220
Правила выполнения сборки ... 221
Работа с нагрузками ... 221
5.14.Копирование расчетной схемы ... 222
5.15.Копирование фрагмента схемы ... 225
5.16.Формирование расчетных схем из объемных элементов ... 226
5.17.Геометрические преобразования ... 226
Перенос ... 227
Поворот вокруг заданной оси ... 227
Масштабирование вдоль заданной прямой ... 227
Масштабирование в заданной плоскости ... 227
Зеркальное отражение по заданной оси ... 228
Масштабирование (полное) ... 228
Примеры выполнения геометрических преобразований ... 228
5.18.Задание сетки координационных (разбивочных) осей ... 230
5.19.Ввод схемы на сетке координационных осей ... 232
5.20.Копирование вдоль траектории ... 233
Траектории ... 233
Копирование схемы с использованием траектории в качестве «направляющей» ... 234
5.21.Графический редактор ... 235

**6. ОПЕРАЦИИ С УЗЛАМИ И ЭЛЕМЕНТАМИ ... 236**
6.1.Выбор узлов и элементов ... 236
6.2.Операции с узлами ... 239
Ввод узлов ... 240
Удаление узлов ... 241
Восстановление удаленных узлов ... 241
Ввод дополнительных узлов между узлами ... 241

Перенос узлов ..... 242
Объединение узлов с совпадающими координатами ..... 244
Генерация узлов по дуге ..... 244
Перенос начала системы координат ..... 245
Ввод узлов на заданном расстоянии от отмеченных ..... 245
Замена узла в элементах ..... 246
Отметка (выбор) узлов ..... 246
Ввод узлов в точках пересечения разбивочных осей ..... 246
Генерация образующей по формуле ..... 247
Перенос узлов в заданную плоскость ..... 248
Округление координат узлов ..... 249
Перенумерация узлов ..... 249
Копирование свойств узла ..... 250
6.3.Операции с элементами ..... 251
Ввод пластин ..... 252
Ввод стержней ..... 254
Ввод объемных элементов ..... 255
Удаление элементов ..... 256
Восстановление удаленных элементов ..... 257
Ввод стержней с учетом промежуточных узлов ..... 257
Разбивка стержня ..... 257
Дробление стержней в точке пересечения ..... 258
Объединение стержневых элементов ..... 258
Ввод стержней по дуге ..... 259
Выбор элементов ..... 259
Объединение совпадающих элементов ..... 260
Дробление четырехузловых пластин ..... 260
Дробление четырехузловых пластин на трехузловые ..... 260
Дробление трехузловых пластин ..... 261
Дробление объемных элементов ..... 262
Дробление пластин с учетом промежуточных узлов ..... 262
Разделение элементов ..... 263
Присоединение дополнительных узлов к элементам ..... 263
Дробление стержней с учетом промежуточных узлов ..... 264
Сдвиг элементов ..... 264
Отсоединение всех дополнительных узлов от граней элементов ..... 265
Объединение элементов ..... 265
Дробление пластин по линии пересечения ..... 266
Продолжить стержень до пластины ..... 266
Сопряжение стержней ..... 266
Построение стержней, перпендикулярных выбранному ..... 267
Оценка качества триангуляции ..... 267
Повышение качества триангуляции ..... 267
Экспорт полигона из выделенных пластин ..... 268
Перенумерация элементов ..... 268
Копирование свойств элементов ..... 268
Дробление стержней полигоном ..... 270
Создание пластинчатой модели стержня ..... 270
6.4.Ввод и назначение параметров специальных конечных элементов ..... 271
Ввод нуль-элемента ..... 272
Ввод связей конечной жесткости ..... 272
Ввод упругих связей ..... 273
Ввод двухузловых законтурных элементов плиты ..... 274
Ввод одноузловых законтурных элементов плиты ..... 275
Ввод вантовых элементов ..... 275
Ввод односторонних связей ..... 276
Ввод внешних узловых демпферов ..... 277
6.5.Ввод и назначение параметров абсолютно твердых тел ..... 278
Ввод твердого тела ..... 278

Изменение вида твердого тела ... 279
Перенос мастер-узла ... 280
Удаление твердого тела ... 280
Добавление ведомых узлов ... 280
Исключение ведомых узлов ... 280
Перенос ведомых узлов ... 280
6.6.Группы узлов и элементов ... 280
Создание групп ... 281
Корректировка группы ... 281
Выбор группы ... 282
Операции с группами ... 282
Управление группами ... 283

**7. ЗАДАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК УЗЛОВ И ЭЛЕМЕНТОВ ... 285**
7.1.Назначение жесткостных характеристик ... 286
Назначение жесткостных характеристик стержневым элементам ... 286
Линейное изменение размеров сечений стержневых элементов ... 293
Назначение жесткостных характеристик пластинчатым элементам ... 293
Назначение жесткостных характеристик объемным элементам ... 297
Назначение жесткостных характеристик многослойным элементам ... 298
Назначение жесткостных характеристик осесимметричным элементам ... 299
7.2.Назначение жесткостных характеристик специальным конечным элементам ... 300
Цветовая индикация жесткостей ... 301
Удаление дублирующихся типов жесткости ... 302
Перенумерация жесткостей ... 302
Физико-механические свойства материалов ... 303
7.3.Задание свойств элементов ... 304
Назначение типа элемента ... 304
Назначение нелинейных элементов ... 305
Установка или удаление абсолютно жестких вставок ... 305
Смещение срединной плоскости пластин ... 306
Ввод и удаление шарниров и ползунов для стержней ... 307
Ввод и удаление шарниров и ползунов для пластин ... 308
Назначение угла ориентации осей сечения стержня ... 308
Назначение промежуточных сечений вычисления усилий ... 309
Изменение направления местной оси $X_1$ стержней на противоположное ... 310
Изменение направления местной оси $Z_1$ пластинчатых элементов ... 310
Напряжения вдоль заданного направления ... 311
Назначение направления осей ортотропии ... 313
Назначение коэффициентов упругого основания ... 313
Назначение преднапряжения элементам расчетной схемы ... 315
Назначение дополнительных данных для элементов ... 315
7.4.Задание характеристик узлов ... 316
Назначение связей в узлах ... 316
Объединение перемещений ... 317
Условия примыкания стержней ... 318
7.5.Назначение коэффициентов постели элементам расчетной схемы с помощью программы Кросс ... 319
7.6.Литература к главе Задание Характеристик Узлов и Элементов ... 322

**8. ЗАДАНИЕ СХЕМ ЗАГРУЖЕНИЙ ... 323**
8.1.Задание статических загружений ... 323
Автоматическое задание собственного веса ... 324
Узловые нагрузки ... 325
Задание нагрузок на группу узлов ... 326
Нагрузки на стержневые элементы ... 327
Задание нагрузок на группу элементов ... 329
Дислокации ... 329
Нагрузки на пластины ... 331
Задание нагрузок на группу элементов ... 333
Задание нагрузок на объемные элементы ... 334

Температурные нагрузки....336
Нагрузки на области....338
8.2.Расчет на заданные перемещения....340
Нагрузки через «нуль-элемент»....340
Задание нагрузки через смещение связи....341
8.3.Запись загружений....342
8.4.Группы нагрузок....343
Задание нагрузок с использованием групп узлов и элементов....345
Сборка загружений из групп нагрузок....345
Назначение коэффициентов группам нагрузок....347
8.5.Удаление нагрузок, загружений и групп нагрузок....347
Удаление нагрузок....347
Удаление загружений и групп нагрузок....348
Упаковка загружений....348
8.6.Подготовка данных для расчета на динамические воздействия....349
8.7.Назначение параметров динамических воздействий....352
Создание нового загружения....353
Корректировка параметров существующего загружения....356
Особенности задания данных сейсмических воздействий....356
Расчет на сейсмические воздействия согласно СНиП II-7-81*....361
Расчет на сейсмические воздействия согласно СНиП II-7-81* с учетом изменений от 27.12.99 г. ....362
Сейсмика по СП 31-114-2004 Российской Федерации....363
Сейсмика по СП 14.13330.2011 (Актуализированная редакция СНиП II-7-81*) Российской Федерации364
Сейсмика по МГСН 4.19-05....365
Сейсмика по СП 14.13330.2014 и СП 14.13330.2018 (Актуализированная редакция СНиП II-7-81*) Российской Федерации....366
Сейсмика по СП 14.13330.2018 с Изменением № 1 (Актуализированная редакция СНиП II-7-81*) Российской Федерации....368
Расчет по нормам проектирования сейсмостойких атомных станций НП-031-01....369
Расчет на сейсмические воздействия по строительным нормам Украины ДБН В.1.1-12:2006....370
Расчет на сейсмические воздействия по строительным нормам Украины ДБН В.1.1-12:2014....372
Расчет на сейсмические воздействия по СНиП В1.2-4-98 республики Казахстан....373
Расчет на сейсмические воздействия по СНиП РК 2.03-30-2006 республики Казахстан....374
Расчет на сейсмические воздействия по СП РК 2.03-30-2017, СП РК 2.03-30-2017* и НТП РК 08-01.1-2017 республики Казахстан....375
Расчет на сейсмические воздействия по СНРА II-2.02.94 республики Армения....377
Расчет на сейсмические воздействия по СНРА II-6.02.2006 республики Армения....378
Расчет на сейсмические воздействия по СНРА AzDTN 2.3-1 Республики Азербайджан....379
Расчет на сейсмические воздействия по СНТ 2.01.08-99 и СНТ 2.01.08-99* Туркменистана....380
Расчет на сейсмические воздействия по КМК 2.01.03-96, КМК 2.01.03-19 Республики Узбекистан....380
Расчет на сейсмические воздействия по СНиП КР 20-02:2009 Кыргызской Республики....382
Расчет на сейсмические воздействия по ГНиП РТ 22-07-2015, ГНиП РТ 22-07-2018 Республики Таджикистан....382
Расчет на сейсмические воздействия по СП 358.1325800.2017....383
Расчет на сейсмические воздействия по EN 1998-1....384
Расчет на сейсмические воздействия по акселерограмме....386
Расчет на сейсмические воздействия по заданным акселерограммам (3 компоненты)....387
Расчет на сейсмические воздействия при шестикомпонентном воздействии....388
Пульсация ветрового потока....389
Пульсации ветра по СНиП 2.01.07-85*....391
Пульсации ветра в соответствии с Московскими городскими строительными нормами (МГСН)....392
Пульсации ветра по СП 20.13330 (Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*)....392
Импульсное или ударное воздействие....393
Модальный анализ....395
Гармонические колебания....395
Прямое интегрирование уравнений движения....396
Литература к разделу Прямое интегрирование уравнений движения....399
Ввод динамических нагрузок и задание масс....399
8.8.Корректировка параметров загружений/групп нагрузок....400

8.9.Литература к главе Задание Схем Загружений ... 401

**9. ПРЕПРОЦЕССОР ФОРУМ ... 402**
9.1.Общие принципы создания модели ... 402
Инструментальная панель ... 403
Нагрузки ... 407
Группы ... 408
9.2.Структура модели ... 408
Узлы ... 409
Блоки ... 409
Элементы ... 409
9.3.Создание новой модели ... 410
Новый проект ... 410
Создание нового блока ... 411
Ввод элементов ... 411
Копирование схемы и блоков ... 413
Копирование фрагмента схемы ... 415
Перенос элементов из одного блока в другой ... 415
Управление блоками ... 415
9.4.Создание стандартных конструкций ... 416
9.5.Операции с узлами ... 418
9.6.Операции с элементами ... 418
Изменение жесткостных характеристик ... 419
Сведение стен и перекрытий ... 419
Корректировка проемов ... 420
Удаление проемов ... 420
Продлить стержень до пластины ... 421
Расширение плиты отступом от граней ... 421
Разбиение перекрытий и стен балками и колоннами, лежащими в их плоскости ... 422
Дробление пластин по линии пересечения ... 422
Операции с парой плоскостных объектов ... 423
Создание поверхностей вращения ... 424
9.7.Дерево проекта ... 424
Панель управления ... 425
Просмотр и корректировка параметров элементов ... 425
Корректировка геометрии элементов ... 426
9.8.Фильтры отображения ... 433
9.9.Назначение нагрузок ... 433
Параметры режима задания нагрузок ... 434
Таблицы нагрузок ... 434
Постоянные нагрузки ... 434
Временные нагрузки ... 435
Учет постоянных нагрузок ... 436
Особенности учета собственного веса ограждающих конструкций и перегородок ... 436
Назначение типов помещений ... 436
Удаление нагрузок ... 437
Контроль постоянных нагрузок ... 437
9.10.Экспорт модели в SCAD ... 437
Генерация конечно-элементной модели ... 438
Моделирование узла пересечения колонны и перекрытия ... 440
Учет нагрузок ... 441
Диалоговое окно Результаты генерации ... 442
9.11.Связь с архитектурными и графическими системами ... 443
9.12.Передача данных из препроцессора Форум в программу Монолит ... 444
9.13.Пример создания модели в препроцессоре ФОРУМ ... 446

**10. УПРАВЛЕНИЕ ОТОБРАЖЕНИЕМ РАСЧЕТНОЙ СХЕМЫ ... 451**
10.1.Инструментальная панель Визуализация ... 451
Поворот схемы ... 451
Назначение шага поворота ... 452

Непрерывное вращение схемы ....452
Вращение мышкой (орбита) ....452
Проецирование схемы на координатную плоскость ....452
Изометрическая проекция ....453
Выделение плоского фрагмента ....453
Выделение фрагмента с помощью рамки ....454
Отсечение на проекциях ....456
Фрагментация на разбивочных осях ....457
Операции отмены и возврата в режимах фрагментации расчетной схемы ....457
Увеличение изображения ....457
Полноэкранный режим работы ....458
Режим отображения ....458
Фрагментация при помощи дерева ....459
Фрагментация выбранных объектов ....459
Фрагментация неселектированных объектов ....459
Поиск узлов с заданными характеристиками ....459
Поиск элементов с заданными номерами ....460
Сохранение образа экрана ....460
Сохранение текущего отображения расчетной схемы в формате HTML ....460
Сохранение и восстановление ракурса модели на экране ....460
10.2.Отображение информации на расчетной схеме ....461
Общие замечания по отображению информации на схеме ....461
Сохранение и восстановление состояния фильтров ....463
Настройка вывода цифровой информации ....464
Печать расчетной схемы ....464
Начальная установка фильтров ....465
Отображение информации об узлах ....465
Отображение информации об элементах ....471
Отображение нагрузок, масс и заданных смещений ....482
Отображение осей общей системы координат ....487
Отображение координационных осей ....487
Отображение размерных линий ....490
Удаление линий невидимого контура ....490
Прозрачность, освещенность, перспектива ....491
Цветовая индикация групп узлов и элементов ....492
Цветовое отображение заданного армирования ....493
Отображение групп конструктивных элементов ....493
Отмена выбора узлов и элементов ....494
Навигатор ....494
Показать элементы, включенные/не включенные на указанной стадии монтажа ....494
Преднапряжение ....494
Цветовое отображение блоков ....495
Типы помещений ....495
Цветовое отображение групп огнестойкости ....495
10.3.Отображение результатов расчета ....495
Панель Визуализация результатов ....495
Отображение прогибов в стержнях ....495
Сетка конечных элементов на изополях ....496
Отображение деформированной схемы ....496
Вывод значений на изолиниях, изополях и эпюрах ....496
Выборочный вывод значений на изолиниях, изополях и эпюрах ....497
Управление выводом изополей ....497
10.4.Настройка параметров среды ....499
10.5.Настройка цветовой схемы ....503

**11. УПРАВЛЕНИЕ РАСЧЕТОМ ....505**
11.1.Общие параметры ....505
11.2.Метод Гаусса ....507
11.3.Многофронтальный метод ....508

11.4.Итерационный метод ... 508
11.5.PARFES ... 509
11.6.Устойчивость ... 509
11.7.Динамика ... 510
11.8.Нелинейность ... 512
11.9.Элементы ... 513
11.10.Продавливание ... 514
11.11.Специальные настройки ... 514
11.12.Использование оперативной памяти ... 514
11.13.Оптимизация матрицы жесткости ... 515
11.14.Многопоточные вычисления ... 516
11.15.Описание решателей ... 516
Линейная и нелинейная статика ... 516
Многофронтальный решатель ... 517
PARFES ... 519
Итерационный решатель ... 519
Метод Гаусса ... 520
11.16.Описание динамических решателей ... 520
Метод итерации подпространств ... 521
Метод наискорейшего спуска ... 521
Метод Ланцоша ... 521
11.17.Литература к главе Управление Расчетом ... 523

**12. ГРАФИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ... 526**
12.1.Общие принципы управления отображением результатов ... 526
Выбор загружения ... 527
Выбор анализируемого фактора ... 528
Масштаб отображения ... 528
Вывод маркеров, изолиний, изополей и изоповерхностей ... 528
Вывод изолиний и изополей с заданным шагом исследуемого фактора ... 530
Единицы измерения ... 530
Отображение расчетной схемы ... 531
12.2.Анализ перемещений ... 531
Анимация шаговых и временных процессов ... 533
Определение координат центра масс ... 534
Вычисление крена конструкции ... 535
Вычисление крена фундаментной плиты ... 535
Частоты и периоды колебаний ... 536
Веса узловых масс ... 537
Динамические нагрузки по формам колебаний ... 537
Ускорения ... 538
Свободные длины стержневых элементов ... 538
Сохранение деформированной схемы ... 539
Учет начальных несовершенств ... 539
Специальная обработка при выдаче результатов перемещений ... 540
12.3.Анализ усилий в стержнях ... 542
12.4.Анализ усилий и напряжений в пластинчатых элементах ... 544
Управление отображением усилий и напряжений ... 544
Выборочная маркировка силовых факторов ... 546
Построение эпюр напряжений ... 546
Изополя усилий в пластинах ... 547
Единицы измерений силовых факторов ... 549
12.5.Анализ результатов работы постпроцессоров ... 550
12.6.Графическое отображение реакций в связях ... 551
12.7.Графическое отображение усилий в специальных конечных элементах ... 552
12.8.Формирование групп элементов ... 552

**13. ДОКУМЕНТИРОВАНИЕ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ И РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА ... 553**
13.1.Генератор таблиц в текстовом формате ... 553
13.2.Документатор ... 556

13.3.Чтение результатов....558
Окно работы процессора....558
Документирование исходных данных....561
13.4.Перемещения узлов....562
Положительные направления перемещений....562
Таблицы перемещений....563
Перемещения от комбинаций загружений....564
13.5.Таблицы усилий и напряжений в элементах....564
13.6.Напряжения и усилия....566
Усилия в стержнях....566
Плоские конечные элементы....569
Объемные конечные элементы....576
Многослойные элементы оболочки....577
Осесимметричные конечные элементы....578
Специальные конечные элементы....579
13.7.Реакции в связях....581
13.8.Собственные колебания....581
13.9.Расчетные сочетания усилий (РСУ)....583
13.10.РСУ при анализе прогрессирующего обрушения....585
13.11.Расчетные сочетания реакций в связях....585
13.12.Расчетные сочетания перемещений (РСП)....586
13.13.Расчетные сочетания прогибов....586
13.14.Расчетные сочетания продавливания....587
13.15.Нагрузки от фрагмента схемы....587
13.16.Нагрузки продавливания....588
13.17.Анализ устойчивости....588
13.18.Главные и эквивалентные напряжения....589
13.19.Результаты экспертизы элементов железобетонных и стальных конструкций, а также подбора арматуры и сечений элементов стального проката....590

**14. МОНТАЖ....591**
14.1.Создание проекта....591
14.2.Инструментальная панель Монтаж....591
Инициализация новой стадии монтажа....593
Корректировка параметров настройки стадии монтажа....594
Удаление стадии монтажа....594
Добавление элементов на текущей стадии монтажа....594
Удалить элементы на текущей стадии монтажа....595
Изменение модулей упругости для текущей стадии монтажа....595
Формирование списка загружений....596
Назначение и корректировка связей....597
Назначение шарниров в стержнях....597
Удаление шарниров в стержнях....597
Назначение и удаление шарниров в пластинах....597
Назначение и корректировка коэффициентов постели....597
Назначение объединений перемещений....597
Сохранить информацию о текущем этапе как отдельную задачу....598
Управление стадиями монтажа....598
Создание и модификация основной схемы....598
14.3.Расчет....599
14.4.Анализ результатов....599
История по стадиям монтажа....600
14.5.Расчетные сочетания усилий....600
14.6.Расчет элементов стальных и железобетонных конструкций....601

**15. ПРЯМОЕ ИНТЕГРИРОВАНИЕ УРАВНЕНИЙ ДВИЖЕНИЯ....602**
15.1.Постановка задачи....602
15.2.Задание исходной информации....606
Назначение характеристик динамического загружения....606
Задание узловых воздействий....613

15.3.Расчет ... 614
15.4.Результаты расчета ... 614
Результаты расчета в фиксированный момент времени ... 614
Графики перемещений, скоростей и ускорений узлов ... 615
Графики усилий (напряжений) в элементах ... 616
15.5.Возможное использование ... 617
15.6.Литература к главе Прямое Интегрирование Уравнений Движения ... 617

**16. ВАРИАЦИЯ МОДЕЛЕЙ ... 618**
16.1.Учет неопределенности параметров расчетной модели ... 618
16.2.Различия между моделями ... 618
16.3.Формирование пакета моделей ... 618
16.4.Расчетные сочетания усилий ... 620
16.5.Результаты расчета и их анализ ... 620
16.6.Использование вариации моделей ... 621
Параметры жесткости ... 621
Податливость оснований ... 622
Узловые соединения ... 622

**17. КОМБИНАЦИИ ЗАГРУЖЕНИЙ ... 623**

**18. РАСЧЕТНЫЕ СОЧЕТАНИЯ ... 625**
18.1.Основные положения ... 625
Логические связи между загружениями ... 627
18.2.Критерии РСУ ... 627
Стержни ... 627
Мембраны (плоское напряженное состояние) ... 628
Плиты ... 629
Оболочки ... 629
Специальные элементы ... 629
Объемные и осесимметричные элементы ... 629
Нумерация критериев РСУ ... 629
18.3.Критерии РСП ... 630
18.4.Критерии расчетных сочетаний прогибов ... 630
18.5.Критерии расчетных сочетаний реакций в связях ... 630
18.6.Критерии расчетных сочетаний продавливания ... 630
18.7.Подготовка данных ... 631
Особенности задания сочетаний для EN 1990 ... 635
Особенности задания сочетаний для вариаций моделей, монтажа и нелинейных задач ... 635
Учет пульсационной составляющей ветровой нагрузки ... 636
Крановые нагрузки ... 636
Унификация ... 638
Группы для РСУ ... 639
18.8.Расчетные сочетания перемещений ... 640
18.9.Расчетные сочетания реакций в связях ... 640
18.10.Расчетные сочетания прогибов ... 640
18.11.Расчетные сочетания прогрессирующего обрушения ... 640
18.12.Анализ результатов (Постпроцессор РСУ и РСП) ... 641
Создание комбинаций загружений по РСУ ... 641
Показать элементы, в РСУ которых вошли заданные загружения ... 642
Показать сочетания, в которые вошло заданное загружение ... 643
Показать элементы, в РСУ которых вошли заданные комбинации загружений ... 643
Цветовая индикация РСУ ... 644
Цветовая индикация РСП ... 644
Цветовая индикация РСУ (прогрессирующее обрушение) ... 644
Огибающие эпюры РСУ ... 644
Огибающие эпюры РСУ (прогрессирующее обрушение) ... 645
Расчетные сочетания реакций в связях ... 645
Информация об элементе/узле ... 645

**19. АРМИРОВАНИЕ СЕЧЕНИЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ... 647**

Определение основных терминов....647
Армирование двумерных элементов....647
Армирование стержневых элементов....648
19.1.Ограничения реализации....649
19.2.Выбор норм проектирования....650
19.3.Общие сведения о модулях армирования....651
Стержень 2D (одноосное напряженное состояние)....651
Стержень 3D (двухосное напряженное состояние)....652
Плита. Оболочка....653
Балка-стенка....653
19.4.Работа с постпроцессором....654
19.5.Конструктивные элементы и группы конструктивных элементов....654
19.6.Ввод исходных данных....655
Формирование новых конструктивных групп....655
Диалоговые окна Армирование стержней и Армирование пластин....656
Подбор с ограничением....658
Учет максимально допустимых прогибов и перемещений....658
Коэффициенты надежности по ответственности....659
Дополнительные настройки....660
Дополнительная информация по исходным данным....663
Корректировка исходных данных конструктивных групп....668
Разделение группы армирования на две группы и более....668
19.7.Основные и дополнительные группы....668
19.8.Селекция элементов группы....669
19.9.Режим визуализации активной группы....669
19.10.Управление группами железобетонных конструктивных элементов....669
Назначение класса бетона и арматуры....671
Информация о группах армирования....672
19.11.Настройка списка шагов арматуры....673
19.12.Подбор арматуры....674
Вывод результатов подбора....675
Преобразование результатов подбора арматуры....676
Графическое представление результатов подбора арматуры в стержневых элементах....678
Графическое представление результатов подбора арматуры в пластинчатых элементах....679
Экспорт результатов подбора арматуры в плите в конструирующую подсистему программы ALLPLAN....681
Формирование отчета....681
19.13.Чтение результатов подбора арматуры....682
Стержневые элементы....682
Пластинчатые элементы....684
19.14.Экспертиза заданного армирования....684
Задание схемы армирования пластинчатых элементов....685
Задание схемы армирования стержневых элементов....687
Графическое представление заданного армирования в стержневых элементах....689
Отображение цветовой карты заданного армирования в пластинчатых элементах....689
Отображение результатов экспертизы....689
Экстремальные значения факторов....690
Формирование отчета....691
Информация об элементе - анализ железобетонных конструкций....691
Фильтр Заданное армирование....693
19.15.Вес заданной арматуры....694
19.16.Основные принципы подбора арматуры в конечных элементах плиты и оболочки....695
Выбор типа армирования....695
Проверка прочности....698
Расчет на действие поперечных сил....699
Определение ширины раскрытия трещин....699
Общая схема алгоритма....701
19.17.Реализация СНиП 52-101-2003 и СП 63.13330....701
19.18.Особенности расчетов по EN 1992-1-1....702

19.19.Особенности расчетов по ДБН В.2.6-98:2009 ... 704
19.20.Факторы в деформационной и силовой моделях ... 704
19.21.Расчет круглых сечений ... 706
19.22.Примеры использования результатов подбора арматуры при конструировании ... 706
19.23.Расчет на продавливание ... 707
Подготовка данных, расчет и анализ результатов ... 709
Назначение узлов продавливания ... 709
Селекция узлов продавливания ... 710
Визуализация узлов продавливания ... 710
Расчет ... 711
Визуализация контуров продавливания ... 711
Отображение результатов ... 711
Таблица результатов ... 712
Формирование отчета ... 713
19.24.Литература к главе Армирование Сечений Железобетонных Элементов ... 713

**20. ПРОВЕРКА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СТАЛЬНЫХ СЕЧЕНИЙ ... 714**
Ввод исходных данных ... 714
20.1.Настройка параметров ... 716
Стали ... 716
Коэффициенты условий работы ... 717
Предельные гибкости ... 717
Формирование новых конструктивных групп ... 718
20.2.Назначение новых конструктивных элементов ... 718
Расчетные длины ... 718
Критический момент ... 719
Учет максимально допустимых прогибов и перемещений ... 720
Коэффициенты надежности по ответственности ... 722
Замена сечения конструктивного элемента ... 722
Тип конструктивного элемента ... 722
Учет коррозии ... 725
Дополнительные настройки ... 725
Копирование параметров конструктивных элементов ... 725
Контроль конструктивных элементов ... 726
20.3.Назначение групп конструктивных элементов ... 726
Учет максимально допустимых перемещений ... 727
20.4.Корректировка параметров конструктивных элементов и групп конструктивных элементов ... 727
Копирование параметров групп конструктивных элементов ... 728
20.5.Основные и дополнительные группы ... 728
20.6.Расчет холодногнутых профилей ... 729
20.7.Назначение групп унификации ... 734
20.8.Селекция элементов группы ... 735
20.9.Режим визуализации активной группы ... 735
20.10.Управление группами стальных конструктивных элементов и группами унификации ... 735
20.11.Смена сталей в группах конструктивных элементов ... 737
20.12.Информация о группах стальных конструктивных элементов ... 738
20.13.Визуализация измененных сечений ... 738
20.14.Восстановление исходных сечений ... 739
20.15.Смена норм проектирования ... 739
20.16.Экспертиза и подбор сечений ... 740
20.17.О сейсмических и особых воздействиях ... 754
20.18.Расчет «нестандартных» сечений ... 754
20.19.Отображение результатов ... 755
20.20.Формирование отчета ... 757
20.21.Экстремальные значения факторов ... 758
20.22.Создание элементов технической спецификации стали ... 759
20.23.Расход стали ... 760
20.24.Выполнение подбора сечений ... 761
20.25.Информация о результатах подбора ... 763

Информация о работе постпроцессора ..... 763

**21. ПРОВЕРКА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ДЕРЕВЯННЫХ СЕЧЕНИЙ ..... 764**

Ввод исходных данных ..... 764
21.1.Формирование новых конструктивных групп ..... 765
21.2.Назначение новых конструктивных элементов ..... 766
Расчетные длины ..... 766
Учет максимально допустимых прогибов и перемещений ..... 767
Коэффициенты надежности по ответственности ..... 768
Тип конструктивного элемента ..... 768
Копирование параметров конструктивных элементов ..... 769
Контроль конструктивных элементов ..... 769
21.3.Назначение групп конструктивных элементов ..... 770
Учет максимально допустимых перемещений ..... 770
21.4.Корректировка параметров конструктивных элементов и групп конструктивных элементов ..... 770
21.5.Копирование параметров групп конструктивных элементов ..... 772
21.6.Основные и дополнительные группы ..... 772
21.7.Выбор элементов группы ..... 773
21.8.Визуализация активной группы ..... 773
21.9.Управление группами конструктивных элементов ..... 773
21.10.Информация о группах деревянных конструктивных элементов ..... 775
21.11.Смена норм проектирования ..... 775
21.12.Экспертиза сечений ..... 776
21.13.О сейсмических и особых воздействиях ..... 779
21.14.Отображение результатов ..... 779
21.15.Формирование отчета ..... 781
21.16.Экстремальные значения факторов ..... 782

**22. ЭКСПЕРТИЗА ОГНЕСТОЙКОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ..... 783**

22.1.Огнестойкость элементов стальных конструкций ..... 783
22.2.Огнестойкость элементов железобетонных конструкций ..... 784
Теплотехнический расчет ..... 784
Прочностной расчет ..... 785
22.3.Результаты анализа огнестойкости ..... 786
22.4.Подготовка исходных данных, расчет и анализ результатов ..... 786
Инструментальная панель Огнестойкость ..... 786
Назначение параметров расчета огнестойкости ..... 787
Формирование новой группы стержневых элементов ..... 787
Корректировка ранее заданных групп огнестойкости ..... 788
Удаление групп огнестойкости ..... 788
Формирование и корректировка групп огнестойкости пластинчатых элементов ..... 789
Управление группами огнестойкости ..... 789
Выбор норм проектирования ..... 789
22.5.Анализ огнестойкости элементов ..... 790

**23. РАСЧЕТ НАГРУЗОК ОТ ФРАГМЕНТА СХЕМЫ ..... 792**

23.1.Ввод исходных данных ..... 793
23.2.Описание фрагментов ..... 794
23.3.Графический анализ результатов расчета нагрузок от фрагмента схемы ..... 795

**24. РАСЧЕТ НА ПРОГРЕССИРУЮЩЕЕ (ЛАВИНООБРАЗНОЕ) ОБРУШЕНИЕ ..... 797**

24.1.Квазистатический анализ ..... 799
Подготовка данных ..... 799
Диалоговое окно Прогрессирующее обрушение ..... 800
Особенности использования результатов подбора арматуры ..... 801
Расчет ..... 801
Анализ результатов ..... 802
24.2.Динамический анализ ..... 803
Подготовка данных ..... 803
Расчет ..... 804
Представление и анализ результатов ..... 804

**25. АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ... 806**
25.1.Постановка задачи ... 806
25.2.Поиск коэффициентов запаса устойчивости ... 807
25.3.Формы потери устойчивости ... 808
25.4.Свободные длины ... 808
25.5.Свободные длины и коэффициенты расчетной длины ... 809
25.6.Строительные нормы и анализ устойчивости стержней ... 809
25.7.Ввод данных ... 810
25.8.Особенности анализа для динамических нагружений ... 812
25.9.Анализ результатов ... 812
25.10.Опрокидывание ... 812
Исходные данные ... 813
Расчет ... 814
Результаты ... 814
25.11.Литература к главе Анализ Устойчивости ... 814

**26. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОСТПРОЦЕССОР ... 815**

**27. ГЛАВНЫЕ И ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ ... 817**
27.1.Главные напряжения для конечных элементов различных типов ... 818
Пространственная задача теории упругости ... 818
Элементы балки-стенки ... 818
Плиты и оболочки ... 819
Стержневые элементы ... 819
27.2.Вычисление эквивалентных напряжений ... 820
27.3.Подготовка данных для расчета главных и эквивалентных напряжений ... 821
27.4.Графическое отображение результатов расчета главных и эквивалентных напряжений ... 822
Цветовое отображение главных/эквивалентных напряжений в стержнях ... 824
Отображения направлений главных площадок ... 825

**28. НЕЛИНЕЙНЫЕ РАСЧЕТЫ В СИСТЕМЕ SCAD ... 826**
28.1.Общие сведения ... 826
28.2.Геометрическая нелинейность ... 827
Вантовые элементы ... 829
Односторонние связи ... 831
28.3.Физическая нелинейность ... 832
Общие сведения ... 832
Физически нелинейные конечные элементы ... 833
Модели материалов ... 834
Учет геометрической нелинейности ... 845
28.4.Управление нелинейным расчетом ... 846
28.5.Результаты расчета ... 848
История нелинейного загружения ... 850
28.6.Литература к главе Нелинейные Расчеты в Системе SCAD ... 850

**29. АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ... 851**
29.1.Подготовка исходных данных ... 852
29.2.Результаты расчета ... 852

**30. СПЕКТРЫ ОТВЕТА ... 854**
30.1.Расчет на сейсмические воздействия ... 854
30.2.Акселерограммы и спектры ответа ... 855
30.3.Ввод данных и анализ результатов ... 856
30.4.Подготовка файлов акселерограмм ... 857
30.5.Литература к главе Спектры Ответа ... 858

**31. ЛИНИИ И ПОВЕРХНОСТИ ВЛИЯНИЯ ... 859**
31.1.Создание маршрутов движения ... 859
Создание маршрута и его привязка к существующей модели ... 859
Особенности реализации ... 860
31.2.Подготовка данных для расчета линий и поверхностей влияния ... 860
31.3.Расчет ... 860

31.4.Графическое отображение результатов расчета линий и поверхностей влияния ....861

**32. ЦЕНТРЫ ЖЕСТКОСТИ....863**
32.1.Определение центра жесткости....863
32.2.Ввод исходных данных и расчет....863
32.3.Анализ результатов ....864

**33. ЯЗЫК АРХИВАЦИИ ДАННЫХ....865**
33.1.Экспорт и импорт текстовых файлов с исходными данными ....865
33.2.Архитектура и синтаксис языка архивации ....866
Сокращение объёма исходной информации при наличии регулярностей....868
33.3.Общая информация о задаче. Документ 0 «Заглавный»....869
Шифр задачи (строка 1)....870
Признак схемы (строка 2)....870
Системы координат (строка 3)....871
Вычисление усилий в промежуточных сечениях и узлах (строка 4) ....872
Управление вычислением расчетных сочетаний усилий (строка 8) ....872
Унификация сечений элементов (строка 12) ....872
Организация групп расчетных сочетаний усилий (строка 15)....872
Допускаемое количество крановых и тормозных загружений, входящих в расчетные сочетания усилий (строка 16)....873
Данные для устойчивости (строка 21)....873
Данные для вычисления главных и эквивалентных напряжений (строка 22)....873
Параметры расчета (строка 23)....873
Списки удаленных узлов и элементов (строки 31 и 32) ....874
Единицы измерения (строка 33) ....874
33.4.Документы, описывающие расчетную схему ....874
Документ 1. «Элементы»....874
Документ 2. «Условия примыкания» ....875
Документ 4. «Координаты»....875
Документ 5. «Связи»....875
33.5.Свойства элементов....876
Документ 3. «Жесткостные характеристики» ....876
Документ 31. «Жесткие вставки» ....881
Документ 32. «Положение главных осей инерции» ....881
Документ 33. «Системы координат вычисления напряжений и усилий»....882
Документ 34. «Коэффициенты постели» ....882
33.6.Задание статических загружений....882
Документ 6. «Типы нагрузок» ....882
Документ 7. «Величины нагрузок» ....883
Документы 9 и 10. «Группы нагрузок»....885
33.7.Описание схем динамических загружений ....885
Описание масс в документах 6 и 7 ....886
Характеристики динамических загружений....886
Задание импульсных нагрузок....886
Задание ударных нагрузок ....887
Файлы с параметрами импульсов....887
Документ 71. «История нагружения» ....888
33.8.Вспомогательные документы....888
Документ 21. «Координационные оси» ....888
Документ 27. «Контур триангуляции»....888
Документ 47. «Группы элементов» ....888
Документ 48. «Группы узлов» ....889
33.9.Документы Монтажа....889
33.10.Документы для проверки и подбора сечений из стального проката....889
33.11.Документы для армирования сечений ж/б элементов и его проверки ....889
33.12.Исходные данные постпроцессоров ....889
Документы расчетных сочетаний....889
Документы расчетных сочетаний для нелинейного расчета....890
Документ 36. «Комбинации загружений» ....890

Документ 37. «Устойчивость» ... 890
Документ 38. «Главные и эквивалентные напряжения» ... 890
Документ 39. «Нагрузки от фрагмента схемы» ... 891
Документ 53. «Армирование железобетонных элементов» ... 891
Документ 70. Прогрессирующее обрушение ... 891
33.13.Специальные системы координат ... 892
33.14.Задание нагрузки в специальных системах координат ... 893

**34. СЕРВИСНЫЕ ФУНКЦИИ ... 895**
34.1.Сохранение фрагмента ... 895
34.2.Определение площади, периметра и углов полигонов ... 895
34.3.Специальные функции раздела меню Сервис ... 896
Калькулятор для расчета по формулам ... 896
Калькулятор для преобразования единиц измерения ... 897
Характеристики бетона ... 898
Характеристики арматуры ... 898
34.4.Импорт и экспорт исходных данных, подготовленных в виде текстового описания ... 901
34.5.Комментарии к проекту ... 902
34.6.Просмотр сортаментов металлопроката ... 903
34.7.Графический редактор ... 904
Ввод графических объектов ... 906
Редактирование объектов ... 907
34.8.Раздел Обслуживание дерева проектов ... 909
34.9.Редактор акселерограмм ... 909
Главное окно ... 910
Параметры настройки ... 911
Корректировка акселерограммы ... 912
Построение графиков ... 914
Нелинейные спектры ... 915
Общие параметры ... 915
Огибающие ... 917
Корреляция ... 917
Синтез акселерограмм ... 918
34.10.Редактор графика коэффициентов динамичности ... 920
34.11.Программа КоКон - электронный справочник ... 921
34.12.Программа Куст - электронный расчетно-теоретический справочник проектировщика ... 922
34.13.Литература к главе Сервисные Функции ... 922

**35. НАСТРОЙКИ ПРОГРАММЫ ... 923**
35.1.Единицы измерений ... 923
35.2.Экспресс-настройка единиц измерений ... 924
35.3.Установка шрифтов ... 924
35.4.Каталоги металлопроката ... 925
35.5.Отчет и языки ... 926
35.6.Интерфейс ... 926
35.7.Настройки EN 1993 ... 927
35.8.Настройки визуализации таблиц результатов ... 927
35.9.Оформление листов для печати ... 928
35.10.Настройки норм проектирования ... 928
35.11.Назначение рабочих директорий ... 929
35.12.Настройки табличного представления ... 929
35.13.Настройка панелей инструментов ... 929

**36. ИМПОРТ И ЭКСПОРТ ДАННЫХ SCAD ... 931**
36.1.Импорт расчетных схем ... 931
Импорт графических файлов ... 934
Плагины ... 935
IFC ... 937
CIS/2 ... 938
SDNF ... 938

GMSH ..... 938
GTC/GTCX/SMLX ..... 938
Femap ..... 939
STAAD ..... 939
ABAQUS ..... 939
ANSYS ..... 941
SAF ..... 942
SLI ..... 942
36.2.Экспорт данных SCAD ..... 943
IFC ..... 943
CIS/2 ..... 944
SDNF ..... 945
GMSH ..... 946
GTC/GTCX/SMLX ..... 946
Femap ..... 947
STAAD ..... 948
ABAQUS ..... 949
ANSYS ..... 951
SAF ..... 951
SLI ..... 952

**ПРИЛОЖЕНИЯ ..... 953**
Список сортаментов прокатных профилей ..... 953
Соглашение об именах файлов в рабочем каталоге вычислительного комплекса SCAD ..... 963
"Горячие" клавиши и контекстное меню ..... 966

**ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ ..... 969**

**НОРМАТИВНАЯ ЛИТЕРАТУРА ..... 973**

**ОГЛАВЛЕНИЕ ..... 975**