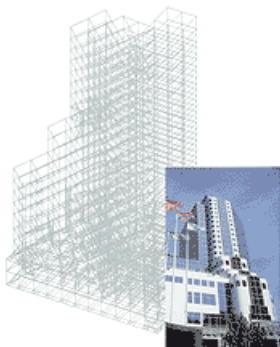


А.В.Перельмутер  
В.И.Сливкер

**РАСЧЕТНЫЕ МОДЕЛИ  
СООРУЖЕНИЙ  
И ВОЗМОЖНОСТЬ  
ИХ АНАЛИЗА**

ИНТЕГРИРОВАННАЯ СИСТЕМА АНАЛИЗА КОНСТРУКЦИЙ  
**Structure CAD**



КИЕВ • 2001

## **РАСЧЕТНЫЕ МОДЕЛИ СООРУЖЕНИЙ И ВОЗМОЖНОСТЬ ИХ АНАЛИЗА**

**Перельмутер Анатолий Викторович**

Доктор технических наук e-mail: [aperel@i.com.ua](mailto:aperel@i.com.ua)

**Сливкер Владимир Исаевич**

Доктор технических наук, профессор e-mail: [slivker@VS3491.spb.edu](mailto:slivker@VS3491.spb.edu)

Издание второе  
Переработанное и дополненное

Киев, Издательство “Сталь”, 2002

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ПРЕДИСЛОВИЕ КО ВТОРОМУ ИЗДАНИЮ</b>	<b>IX-XI</b>
<b>ПРЕДИСЛОВИЕ</b>	<b>XIII-XIX</b>
<b>1 ОБЪЕКТЫ РАСЧЕТА И ПРОБЛЕМА МОДЕЛИРОВАНИЯ</b>	<b>1</b>
1.1 Многомерность и многофункциональность	1
1.2 Основные факторы, учитываемые при построении расчетной модели	3
1.3 Неопределенность в системе знаний об объекте	6
1.4 Эксперимент и практический опыт	8
1.5 Общие проблемы моделирования	11
1.6 Мажорантные и минорантные модели	14
1.7 Апостериорный анализ расчетной схемы	15
Литература	17
<b>2 ПОСТРОЕНИЕ РАСЧЕТНОЙ СХЕМЫ</b>	<b>19</b>
2.1 Определяющие параметры и число степеней свободы	20
2.2 Модель нагружения – составная часть расчетной схемы	24
2.3 Контроль расчетной схемы и средства ее описания	28
2.4 Некоторые приемы	38
2.5 Моносвязи и полисвязи в расчетной схеме	46
2.6 Абсолютно жесткие тела как типы конечных элементов	50
2.6.1 Одномерные абсолютно жесткие тела	51
2.6.2 Двумерные абсолютно жесткие тела	52
2.6.3 Трехмерные абсолютно жесткие тела	53
2.7 О нелинейных расчетах	56
2.8 Одновременное использование нескольких схем	59
2.9 Сопоставление расчетных и экспериментальных данных	64
Литература	68

<b>3</b>	<b>ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ ДИСКРЕТНЫХ СИСТЕМ</b>	<b>71</b>
3.1	Разрешающие уравнения	71
3.1.1	Метод перемещений	74
3.1.2	Метод сил	78
3.1.2	Дуализм метода перемещений и метода сил. Пректоры	80
3.2	Статико-кинематический анализ	84
3.2.1	Замечание о дислокациях	88
3.3	Снова о полисвязях. Вариационная формулировка	90
3.4	Нуль-элементы	99
3.5	Геометрическая нелинейность. Устойчивость	106
3.5.1	Четыре этажа геометрически нелинейных постановок задач	107
3.5.2	Геометрическая нелинейность для стержней ферменного типа	108
3.5.3	Геометрически нелинейные уравнения в вариациях	115
3.6	Конструктивная нелинейность – системы с односторонними связями	118
3.7	Вантовые элементы в расчетной модели	125
3.7.1	Координатные оси	128
3.7.2	Задание преднапряжения	130
3.7.3	О линеаризованных моделях вантовых конструкций	131
3.7.4	Линеаризация вантовых элементов расчетной схемы	133
3.7.5	Линеаризация сжато-изогнутых элементов расчетной схемы	138
3.8	Расчет на динамическую нагрузку	140
3.9	Континуальные системы в конечноэлементном описании	145
3.9.1	Замечание о терминологии	146
3.9.2	Замечание о способах изображения расчетных схем	147
	Литература	148
<b>4</b>	<b>КОНЕЧНОЭЛЕМЕНТНЫЕ МОДЕЛИ</b>	<b>151</b>
4.1	Замечание о дискретизации задачи	151
4.2	Основные понятия метода конечных элементов	152
4.3	Моделирование стержневых систем	157
4.4	Моделирование конечноэлементной сеткой	165
4.5	О практической сходимости	167
4.6	Проверка сходимости для некоторых моделей	169
4.7	Экстраполяция Ричардсона	172
4.8	Обход особых точек	176
4.9	Генерация конечноэлементной сетки	181
4.10	О применении гибридных конечных элементов	184
	Литература	189

**5 ОШИБКИ И ЛОВУШКИ**

	193
5.1 Фрагментация	193
5.2 Построение непрерывных полей напряжений в МКЭ	201
5.3 Ошибки и ловушки при стыковке элементов различной размерности	210
5.3.1 Стержни + плиты	212
5.3.2 Стержни + пластины	218
5.3.3 Стержни + объемные элементы	231
5.3.4 Плиты + пластины (сопряжение оболочечных элементов)	231
5.4 Об одном парадоксе при сочетании стержней Бернулли и стержней Тимошенко в расчетной схеме	237
5.5 Аппроксимация геометрической формы и закреплений	246
5.6 Погрешности вычислений, и как с ними можно бороться	249
5.6.1 Замечания о применении суперэлементов	261
5.6.2 Замечания о тестировании программного комплекса	263
5.7 Шаговая процедура	264
Литература	270

**6 АНАЛИЗ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ** 273

6.1 Проблема анализа	273
6.2 Какие результаты расчета нужны	274
6.3 Общая апробация	281
6.4 Характерное перемещение	285
6.5 Вычисление энергии деформации	288
6.6 Последующая обработка результатов	290
Литература	292

**7 НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ ПАРАМЕТРОВ** 293

7.1 Основные источники неопределенности	293
7.2 Методы расчета чувствительности	300
7.3 Чувствительность собственных колебаний	304
7.4 Оценка дополнительных усилий при изменении жесткостей	309
7.5 Теоретические оценки для случая неопределенных жесткостей	312
7.6 Использование методов планирования экспериментов	315
7.7 Предельное равновесие при неопределенном нагружении	322
Литература	324

---

<b>8 АНАЛИЗ НЕКОТОРЫХ КЛАССОВ ЗАДАЧ</b>	<b>327</b>
8.1 Шарнирно – стержневые системы	327
8.2 Монтаж	330
8.2.1 Генетическая нелинейность	336
8.3 Преднапряжение	345
8.4 Конструкции с гидравлическими домкратами	348
8.4.1 Жидкостный конечный элемент	353
8.5 Модель "здание – основание"	354
8.5.1 Учет распределительной способности грунта	354
8.5.2 Модель основания с двумя коэффициентами постели	357
8.5.3 Упругие характеристики основания	362
8.6 О назначении характеристик двухпараметрового упругого основания	365
8.6.1 Модель основания "ССС"	369
8.7 Об использовании конечноэлементной модели основания	377
8.8 Бистержневая модель тонкостенного стержня открытого профиля	381
8.8.1 Построение бистержневой модели	381
8.8.2 Бистержневая модель тонкостенного стержня, усиленного поперечными планками	388
8.8.3 Усиление тонкостенного стержня поперечной диафрагмой	394
8.8.4 Математическая трактовка бистержневой модели и ее дискретной схемы	395
8.9 Расчетные сочетания нагрузок	399
Литература	406
<b>9 ЗАДАЧИ УСТОЙЧИВОСТИ И СМЕЖНЫЕ ВОПРОСЫ</b>	<b>411</b>
9.1 Проверка устойчивости равновесия	411
9.2 Классическая задача устойчивости равновесия	417
9.3 Свободные длины сжатых стержней	423
9.4 Анализ роли отдельных подсистем	427
9.5 О влиянии дополнительных связей на устойчивость системы	433
9.5.1 Об одной ошибке загадочного характера в программных продуктах при расчете механических систем на устойчивость	435
9.6 Об одном парадоксе в задаче об устойчивости стержня	450
9.7 Учет несовершенств реальной конструкции	457
9.8 Замечания по учету $P - \Delta$ эффектов	462
Литература	463

---

<b>10 ЗАДАЧИ ДИНАМИКИ</b>	465
10.1 <b>Расчетные модели в задачах динамики</b>	465
10.1.1 Динамические степени свободы	470
10.1.2 Динамическая конденсация – процедура Гайяна	471
10.2 Интегрирование уравнений движения	474
10.3 Вынужденные колебания при гармоническом воздействии	479
10.3.1 Модель Гордеевой	488
10.4 Декремент колебаний	492
10.4.1 Конечные элементы из упругого материала	495
10.4.2 Элемент сухого трения	496
10.4.3 Элемент вязкого трения	496
10.4.4 Элемент нелинейно-вязкого трения	497
10.4.5 Демпфирование излучением	498
10.5 Три резонансные кривые	499
10.6 Расчет сооружений на сейсмические воздействия	502
10.6.1 Спектры землетрясений	502
10.6.2 Сейсмическая реакция	503
10.6.3 Расчет по акселерограммам	509
10.6.4 Позтажные спектры отклика	510
10.7 Действие импульсных и ударных нагрузок	512
10.8 Колебания под воздействием пульсаций ветрового потока	516
10.8.1 Моделирование ветрового воздействия	516
10.8.2 Динамическое действие пульсационной составляющей ветровой нагрузки	517
10.8.3 Представление пульсационной составляющей ветровой нагрузки	519
10.8.4 Спектр пульсаций скорости ветра	522
10.8.5 Динамическая составляющая расчетного фактора	522
10.8.6 Проблемы численной реализации	524
Литература	526
<b>11 ВМЕСТО ЗАКЛЮЧЕНИЯ</b>	529
11.1 Наши рекомендации потенциальным пользователям	529
Литература	536
<b>ПРИЛОЖЕНИЯ</b>	537
A Жордановы исключения и их роль в строительной механике	538
A.1 Общее описание	538
A.2 Жордановы исключения с матрицей жесткости системы	541
A.3 Матрица жесткости конечного элемента при нежестком присоединении элемента к узлам	545
A.4 Двойное жорданово исключение	550
Литература	551

---

В	Сопоставление прямых и итерационных методов решения больших конечно-элементных задач строительной механики	552
	В.1 Прямые методы	553
	В.2 Итерационные методы	556
	В.3 Многоуровневые (многосеточные) итерационные методы	559
	В.4 Сравнение эффективности прямых и итерационных методов	561
	В.5 Выводы	567
	Литература	569
С	О решении обобщенной проблемы собственных значений	570
	С.1 Постановка задачи	570
	С.2 Приведение задачи на собственные значения высокого порядка к задаче меньшей размерности	573
	С.3 Методы, основанные на итерации обратной матрицей	574
	С.4 Градиентные методы	583
	С.5 Некоторые особенности анализа частот и форм при расчете сооружений на сейсмические воздействия	589
	Литература	596