

Реализация расчета монолитных жилых зданий на прогрессирующее (лавинообразное) обрушение в среде вычислительного комплекса «SCAD Office»

*Д.т.н., главный научный сотрудник ООО НПФ «СКАД СОФТ» А.В. Перельмутер;
к.т.н., директор ООО НПФ «СКАД СОФТ» Э.З. Криксунов;
инженер, заместитель директора ООО НПФ «СКАД СОФТ» Н.В. Мосина**

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 воздействия или ситуации могут быть вызваны деятельностью человека (взрывы газа, теракты, пожары, наезды транспорта, дефекты проектирования, строительства и эксплуатации зданий, некачественная реконструкция с надстройкой, пристройкой, перепланировкой помещений, сопровождаемая ослаблением или перегрузкой несущих элементов и оснований) или природными явлениями (землетрясения, ураганы, оползни, неравномерные деформации оснований). Поскольку невозможно полностью исключить вероятность возникновения таких ситуаций, необходимо обеспечить определенную степень безопасности людей и сохранности их имущества за счет уменьшения вероятности прогрессирующего обрушения при локальных разрушениях несущих конструкций.

Предлагается три способа проектирования зданий, предупреждающих прогрессирующее обрушение: общее упрочнение всего здания, местное усиление и взаимосвязь элементов. В большинстве американских норм предпочтение отдается первому способу, 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.

Одним из документов, определяющих правила проектирования для предотвращения прогрессирующего обрушения, являются Рекомендации, разработанные МНИИТЭП и НИИЖБ [1], утвержденные и введенные в действие приказом Москомархитектуры в 2005 г.

Тезисно, в изложении этих рекомендаций проблема выглядит следующим образом.

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 ограничиваются.
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. Коэффициенты надежности по нагрузкам следует принимать равными единице.
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.

Реализованный в комплексе SCAD [2] режим предназначен для моделирования поведения конструкций зданий и сооружений в случае аварийных воздействий, вызвавших локальные разрушения отдельных вертикальных несущих элементов. Основные расчетные предпосылки приняты в соответствии с указанными выше рекомендациями.

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 загрузок, включающей постоянные нагрузки и длительные части временных нагрузок 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.

Кроме того, полезно рассмотреть случай, когда инициализация прогрессирующего разрушения происходит после определенного, достаточно продолжительного периода эксплуатации, в течение которого могут реализоваться деформации ползучести. Тогда расчет в геометрически нелинейной постановке даст менее пессимистический прогноз. Такого рода вариант в настоящее время разработан и проходит тестирование.

Подготовка данных и расчет

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 (рис. 1);
- определение расчетных сочетаний усилий (PCY);
- подбор арматуры в элементах железобетонных конструкций с учетом первого и второго (трещиностойкость) предельных состояний;
- проверка и подбор прокатных сечений элементов стальных конструкций.

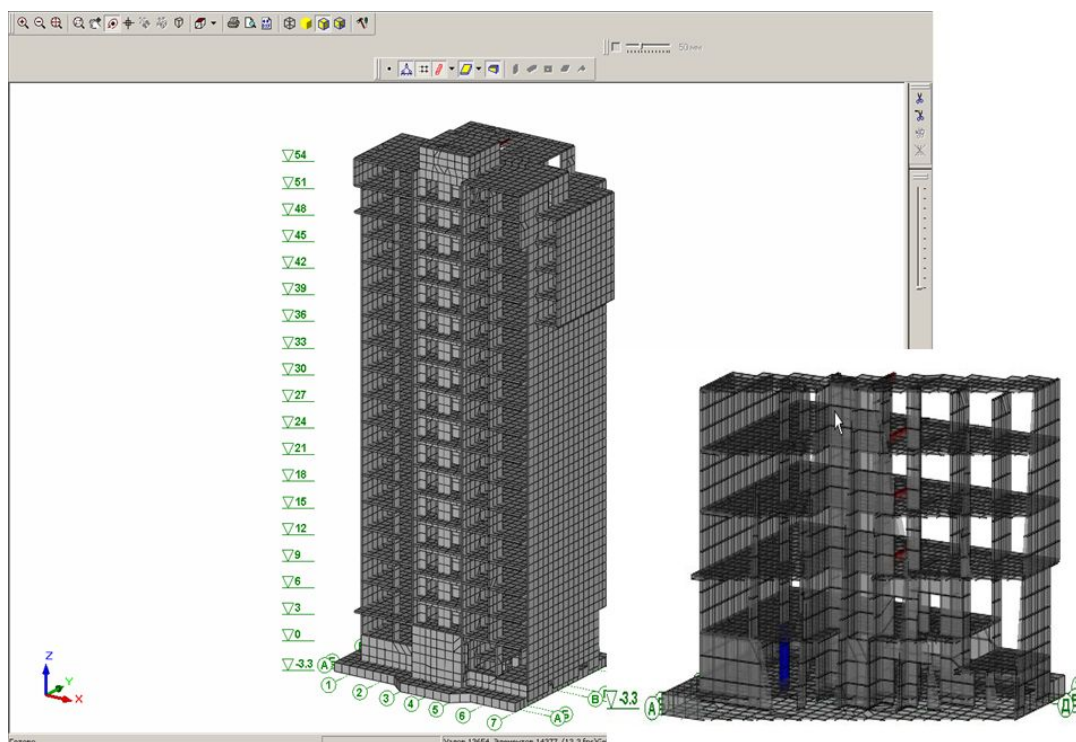


Рисунок 1. Конечно-элементная расчетная модель здания

Перельмутер А.В., Криксунов Э.З., Мосина Н.В. Реализация расчета монолитных жилых зданий на прогрессирующее (лавинообразное) обрушение в среде вычислительного комплекса «SCAD Office»

Для выполнения второго этапа необходимы дополнительные данные, которые включают (рис. 2):

- список конечных элементов, входящих во внезапно удаляемый фрагмент конструкции (на рис. 1 эти элементы окрашены в синий цвет);
- проверочную комбинацию загружений, в которую входят постоянные нагрузки и длительная часть временных нагрузок с коэффициентом 1;
- группу нагрузок, определяющую вес обрушившихся конструкций;
- коэффициент перегрузки (динамичности) – K_f для корректировки реакции системы при внезапном удалении элемента конструкции;
- коэффициенты перегрузки – K_g для корректировки реакции системы на обрушение вышедших из строя конструкций (по умолчанию принимается $K_g = K_f = 2$);
- значение интервала неопределенности.

Если выполняется нелинейный расчет, то следует назначить метод расчета и задать соответствующие методу параметры (количество шагов, количество итераций).

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 ;
- 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.

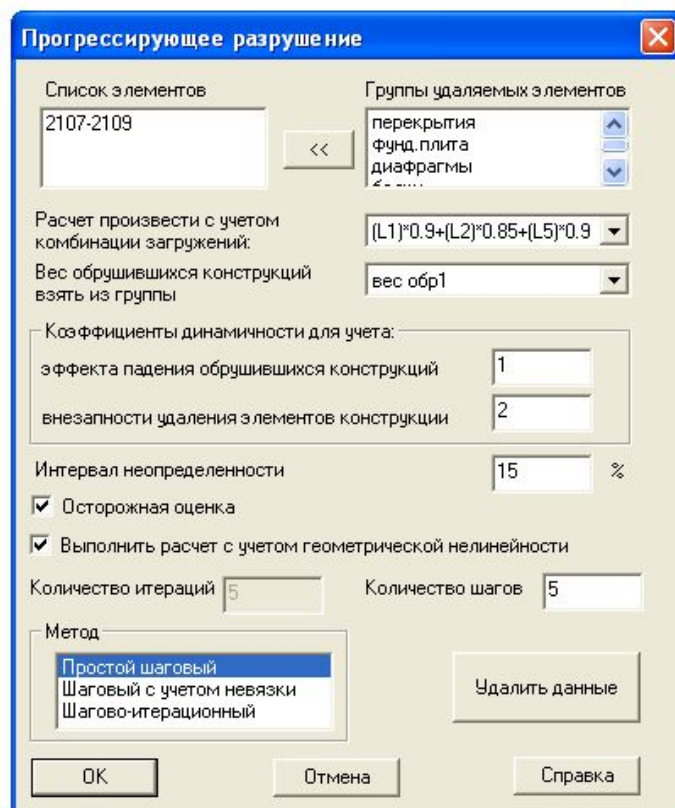


Рисунок 2. Диалоговое окно «Прогрессирующее обрушение»

Анализ результатов

Результаты расчета на прогрессирующее обрушение отображаются в графической форме в двух- и трехцветной цветовой шкале.

В двухцветной шкале элементы разделяются по цвету на работающие, у которых значение максимального по величине коэффициента использования ограничений $K_{\max}$ меньше единицы, и вышедшие из строя ($K_{\max} \geq 1$). В трехцветной шкале (рис. 3) третий цвет используется для указания элементов, попавших в интервал неопределенности, т.е. таких, которые, по мнению расчетчика, с одинаковой вероятностью могут быть отнесены и к вышедшим из строя, и к работающим. Значение интервала неопределенности (в процентах от $K_{\max}$) назначается пользователем.

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 требуется 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.

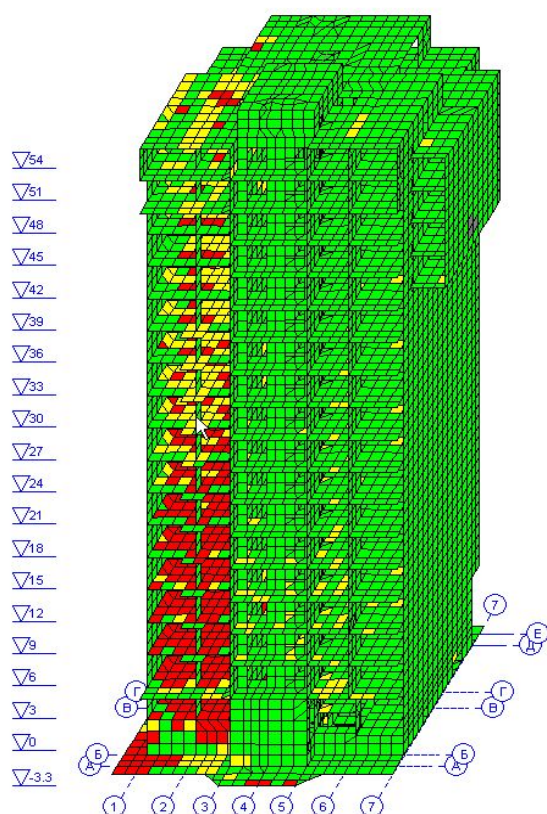


Рисунок 3. Результаты расчета на прогрессирующее обрушение в трехцветной шкале (осторожная оценка)

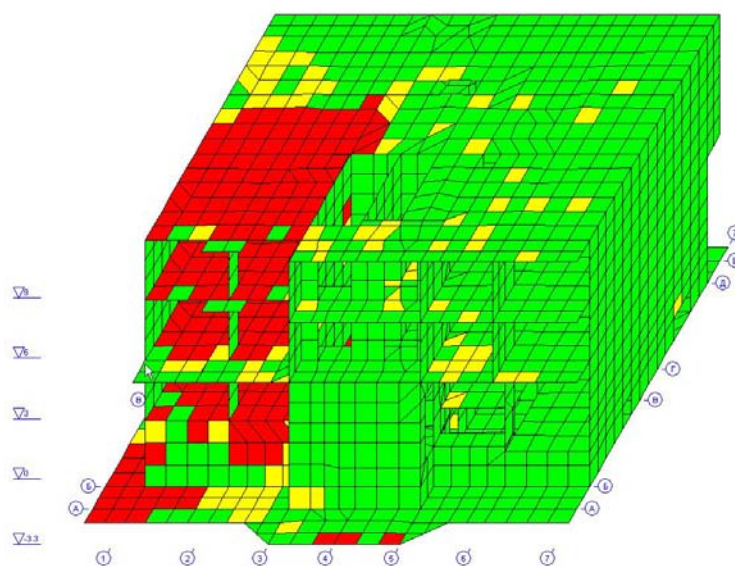


Рисунок 4. Результаты расчета в зоне обрушившегося пилона по оси 2/В (красный цвет соответствует вышедшим из строя элементам при осторожной оценке)

Задание первоначального армирования

Армирование

Файл Параметры Сервис

Характеристики групп | Бетон | Арматура | Трещиностойкость | Минимальное армирование

	N	AS1	AS2	AS3	AS4	ASW1	шаг	ASW2	шаг
1	1	9	9	9	9	3	10	3	10
2									
3									
4									
5									
6									
7									

N - номер последнего сечения с одинаковым минимальным армированием
AS1, AS2, AS3, AS4 - продольное армирование [см²]
ASW1, ASW2 - поперечное армирование [см²]
ШАГ - шаг хомутов [см]

Группа - аналог 2

2003 СНИП 52-01-2003 (Россия) Расчет Выход Справка

При подборе арматуры по результатам прочностного анализа в сечениях элементов преобладает арматура определенного положения. Так, например, в пролетах чаще всего необходима только нижняя арматура, а на опорах – верхняя. В результате разрушения части несущих конструкций характер напряженно-деформированного состояния элемента может измениться. Приопорные зоны перекрытий и балок, примыкающие к вышедшим из строя колонне или пилону, становятся пролетными, со всеми вытекающими отсюда последствиями. В этом случае актуальным может оказаться возможность задания некоего первоначального армирования, меньше которого в сечении быть не должно (рис. 5). Если при подборе арматуры окажется, что первоначального армирования недостаточно, то к нему будет добавлена необходимая арматура. В противном случае в сечении

Рисунок 5. Страница «Минимальное армирование»

останется заданное первоначальное армирование.

Армирование задается значением площади арматуры для каждого ее вида (продольная – нижняя, верхняя, боковая; поперечная – вдоль различных граней сечения), для каждого сечения или ряда сечений стержневых элементов, или для каждого пластинчатого элемента. Первоначальное армирование всегда одинаковое для всех элементов, входящих в одну группу армирования.

На рис. 6 и 7 приведены результаты расчета при заданном минимальном армировании в элементах перекрытий, диафрагм и пилонов в зоне обрушения. Расчет выполнен простым шаговым методом с учетом геометрической нелинейности.

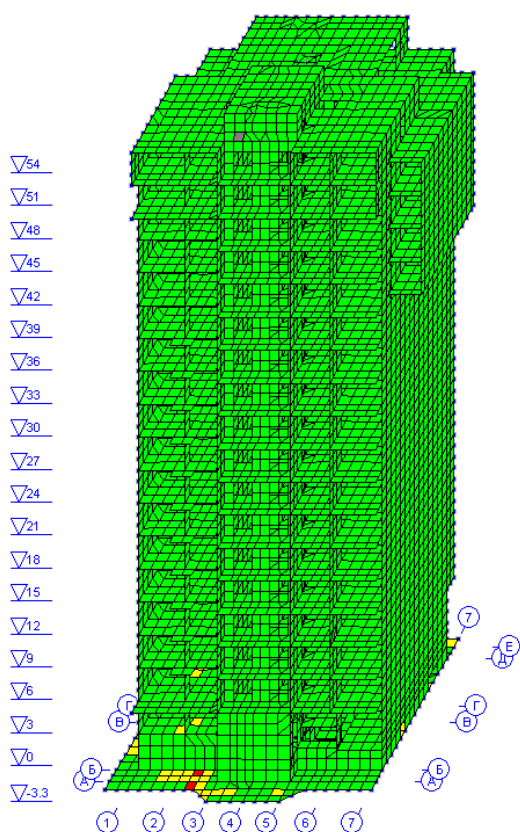
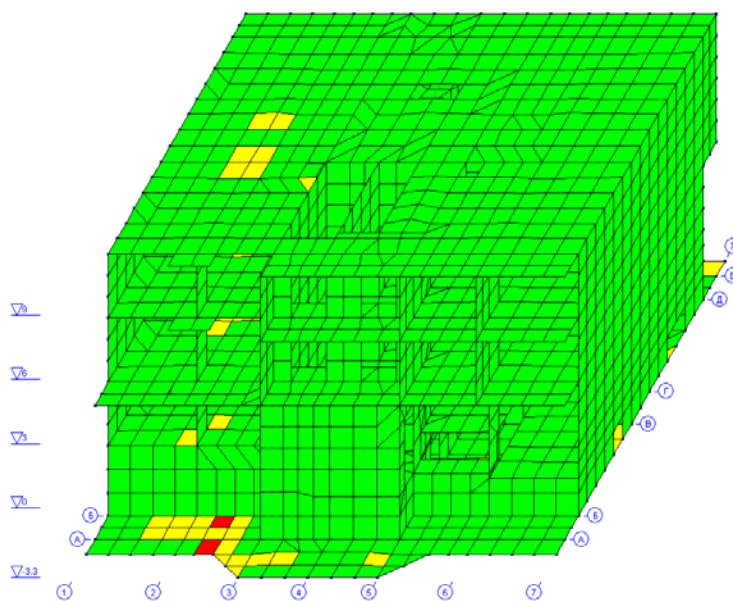


Рисунок 6. Результаты расчета на прогрессирующее обрушение в трехцветной шкале (расчет с учетом геометрической нелинейности при заданном минимальном армировании)



**Рисунок 7. Результаты расчета в зоне обрушившегося
пилона по оси 2/В (расчет с учетом геометрической
нелинейности при заданном минимальном
армировании)**

Некоторые выводы и обобщения

При реализации данного режима 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.

Кроме того, во «Временных рекомендациях по обеспечению безопасности большепролетных сооружений от лавинообразного (прогрессирующего) обрушения при аварийных воздействиях» [3], разработанных НИЦ «Строительство» и ЦНИИСК им. Кучеренко, указано, что «невозможно запроектировать и построить сооружение абсолютно безопасным и при этом не учитывать стоимость предотвращения аварийных ситуаций», а также «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».

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.

Литература

1. Рекомендации по защите монолитных жилых зданий от прогрессирующего обрушения. М., 2005.
2. Карпиловский В. С., Криксунов Э. З., Перельмутер А. В., Маляренко А.А., Микитаренко М.А., Перельмутер М.А. SCAD OFFICE. Вычислительный комплекс SCAD для пользователя. М., 2006.
3. МДС 20-2.2008. Временные рекомендации по обеспечению безопасности большепролетных сооружений от лавинообразного (прогрессирующего) обрушения при аварийных воздействиях. М., 2008.
4. Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. Киев, 2002.

** Наталья Викторовна Мосина, ООО НПФ «СКАД СОФТ»*

Тел. раб. (499)267-40-76; эл. почта: scad@scadsoft.ru