

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



**Т**ермин "прогрессирующее обрушение" относится к ситуации, когда разрушение или повреждение какой-либо малой части конструкции ведет к полному или почти полному разрушению всей конструкции. Поскольку невозможно полностью исключить вероятность возникновения аварийных воздействий или ситуаций, вызванных деятельностью человека (взрывы газа, теракты, пожары, наезды транспорта, дефекты проектирования, строительства и эксплуатации зданий, неквалифицированная их реконструкция с надстройкой, пристройкой, перепланировкой помещений, сопровождаемых ослаблением или перегрузкой несущих элементов и оснований) или природными явлениями (землетрясения, ураганы, оползни, неравномерные деформации оснований), необходимо обеспечить определенную степень безопасности людей, находящихся в зданиях, и сохранность их имущества за счет уменьшения риска прогрессирующего обрушения при локальных разрушениях несущих конструкций.

Для предупреждения прогрессирующего обрушения здания предлагаются три способа проектирования: общее укрепление 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, то есть укрепление наиболее чувствительных мест, трудно поддается стандартизации для включения в нормы проектирования, поскольку для этого нужно четко представлять характер возможных воздействий на здание, в том числе 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, утвержденные и введенные в действие приказом Москомархитектуры в 2005 г.

В изложении этих рекомендаций проблема тезисно 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 при этом 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 надежнос-

ти по нагрузкам следует принимать равными 1;

- 5) расчетные характеристики материалов повышаются за счет применения специальных коэффициентов надежности. Кроме того, расчетные сопротивления умножаются 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 режим предназначен для моделирования поведения конструкции зданий и сооружений в случае аварийных воздействий, вызвавших локальные разрушения отдельных вертикальных несущих элементов. Основные расчетные предпосылки приняты в соответствии с вышеуказанными 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 постоян-

ные 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 (рис. 1). Первый этап включает следующие действия:

- статический и при необходимости динамический расчеты с целью определения напряженно-деформированного состояния конструкции в нормальных условиях эксплуатации;
- определение расчетных сочетаний усилий;
- подбор арматуры в элементах железобетонных конструкций с учетом первого и второго (трекционной-кость) предельных состояний;
- проверка и подбор прокатных сечений элементов стальных конструкций.

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

- список конечных элементов, входящих во внезапно удаляемый фрагмент конструкции;
- проверочная комбинация загружений, в которую входят постоянные нагрузки и длительная часть временных нагрузок с коэффициентом 1;
- группа нагрузок, определяющая вес обрушившихся конструкций;

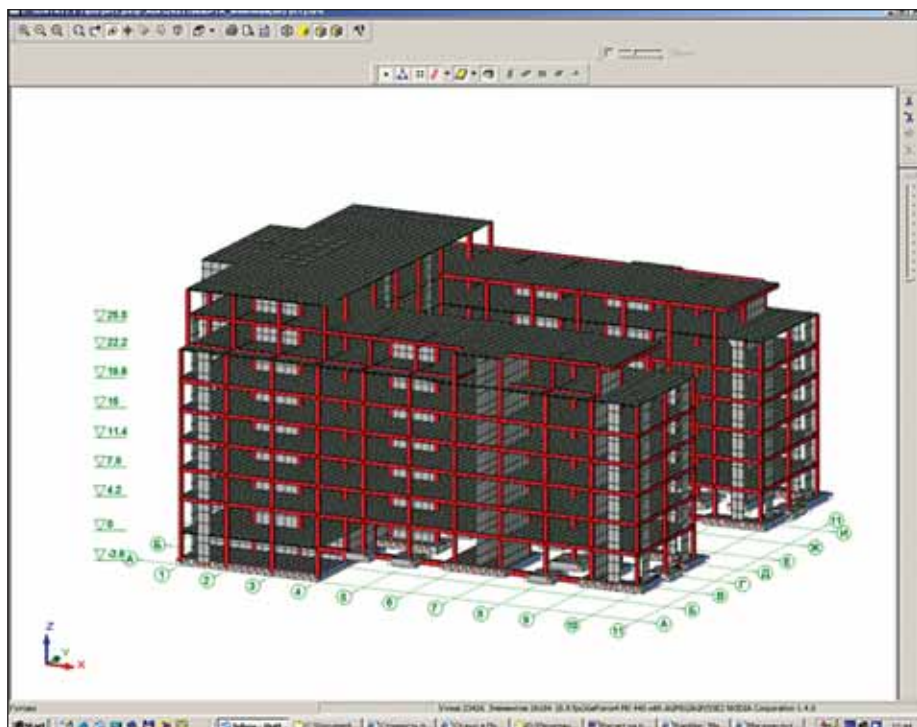


Рис. 1. Конечно-элементная расчетная модель здания

- 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, следует назначить метод расчета и задать соответствующие параметры (количество шагов, количество итераций).

В программе принят следующий порядок выполнения расчета:

- определяются реакции в узлах вышедших из строя элементов, которые примыкают 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.

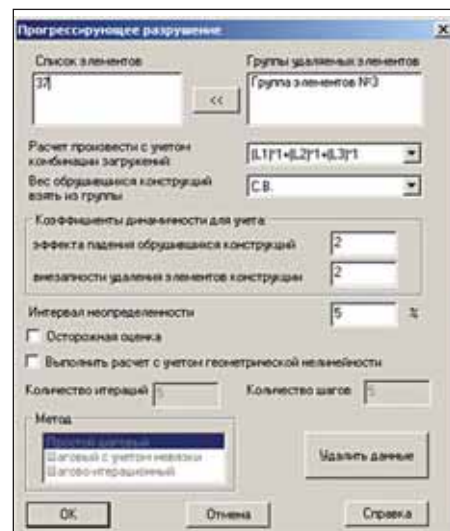


Рис. 2. Диалоговое окно *Прогрессирующее разрушение*

### 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, 4, 5) третий цвет используется для указания элементов, попавших в интервал неопределенности, то есть таких, которые, по мнению расчетчика, с одинаковой вероятностью могут быть отнесены и к вышедшим из строя, и к работающим. Значение интер-



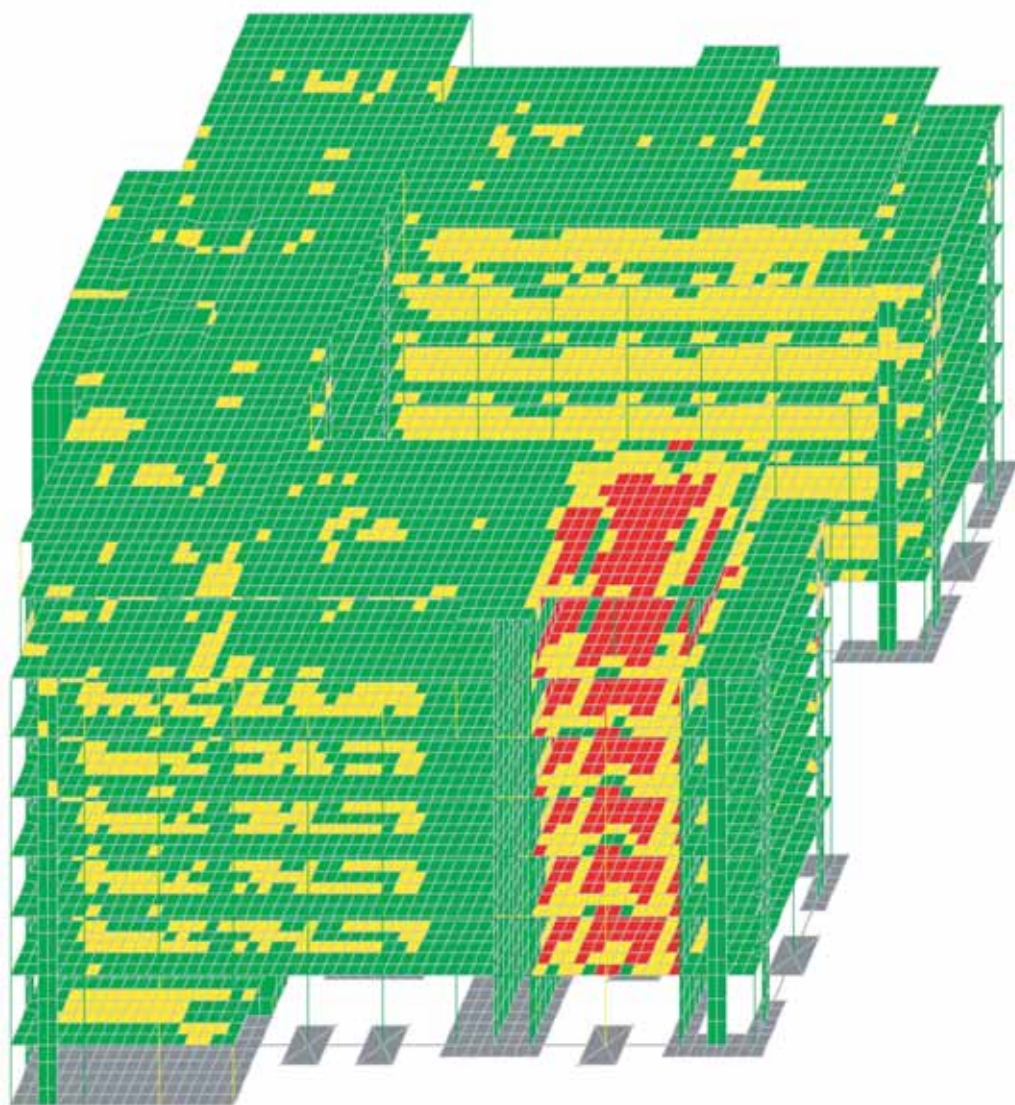


Рис. 3. Результаты расчета на прогрессирующее обрушение в трехцветной шкале (осторожная оценка)

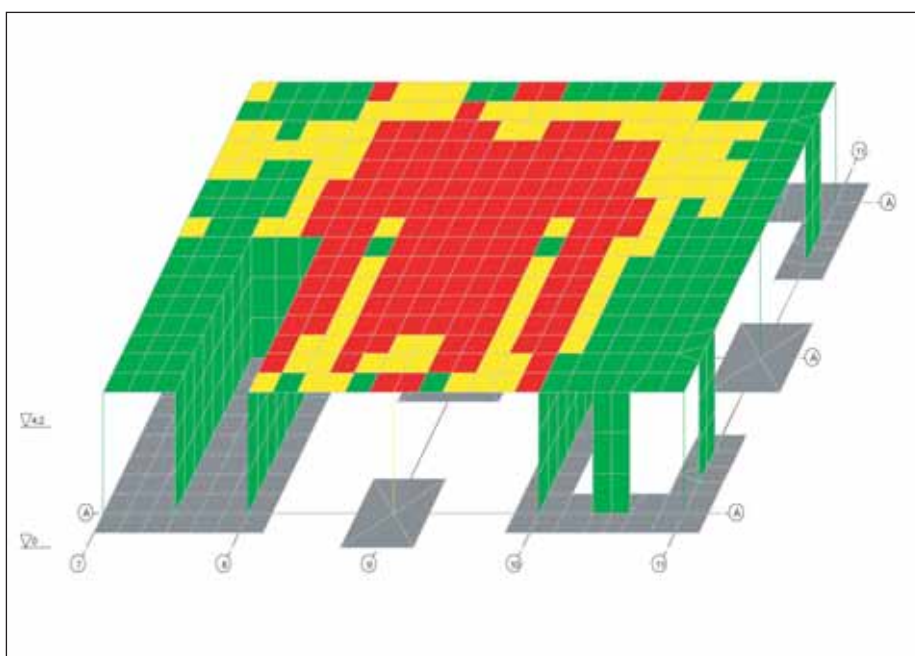


Рис. 4. Результаты расчета в зоне обрушившейся колонны по оси 9/В (красный цвет соответствует вышедшим из строя элементам при осторожной оценке)

вала неопределенности (в % 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 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.

### Задание первоначального армирования

При подборе арматуры по результатам прочностного анализа в сечениях

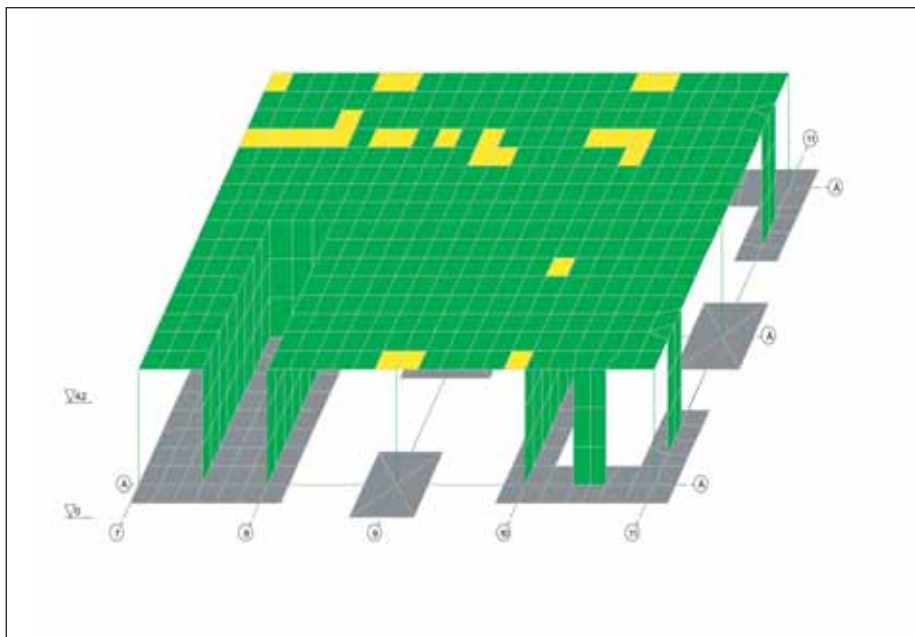


Рис. 5. Результаты расчета в зоне обрушившейся колонны по оси 9/В с учетом геометрической нелинейности

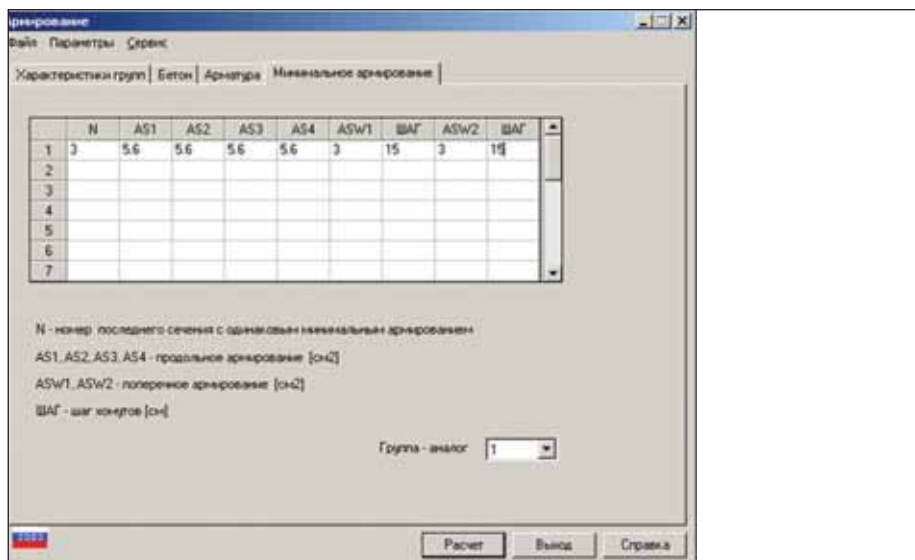


Рис. 6. Окно *Минимальное армирование*

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. При опорные сечения балки, примыкающие к вышедшей из строя колонне, становятся пролетными со всеми вытекающими последствиями. В этом случае актуальной может оказаться возможность задания некоего первоначального армирования, меньше которого в сечении быть не должно (рис. 6). Если при подборе арматуры окажется, что первоначального армирования недостаточно, то к нему будет добавлена необходимая арматура. В противном случае в сечении

останется заданное первоначальное армирование.

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

### Некоторые выводы и обобщения

При реализации данного режима авторами принималась во внимание очевидная условность исходных предположений, заключающаяся в:

- отсутствии достоверной информации о месте и причинах возникнове-

ния процесса и характере его протекания;

- возможности значительного отличия реальных параметров разрушения от приведенных в нормах условий прочности, поскольку расчетные значения параметров прочности далеко не всегда совпадают с наблюдаемыми в действительности.

Кроме того, в "Рекомендациях по снижению опасности (предотвращению) аварийных воздействий и лавинообразного (прогрессирующего) обрушения для большепролетных зданий", разработанных НИЦ "Строительство" и ЦНИИСК им. Кучеренко, отмечается, 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..."

Тем не менее 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. Перельмутер А.В., Сливер В.И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. — Киев: Изд-во "Сталь", 2002.
2. Рекомендации по защите монолитных жилых зданий от прогрессирующего обрушения. — Москва, 2005. — 71 с.
3. Карпиловский В.С., Криксунов Э.З., Маляренко А.А., Микитаренко М.А., Перельмутер А.В., Перельмутер М.А. SCAD Office. Вычислительный комплекс SCAD для пользователя. — Москва: Изд-во АСВ, 2006. — 591 с.

*Анатолий Перельмутер,  
д.т.н., главный научный сотрудник*

*Эдуард Криксунов,  
к.т.н., директор*

*Наталья Мосина,  
заместитель директора*

**ООО "СКАД СОФТ"**  
E-mail: scad@scadsoft.ru