

Защита каркасных зданий от прогрессирующего обрушения

Магистр ГОУ СПбГПУ Д.В. Руденко;
к.т.н., доцент, руководитель ООО «Фордевинд» В.В. Руденко*

Под прогрессирующим (лавинообразным) обрушением понимается распространение начального локального повреждения в виде цепной реакции от элемента к элементу, которое, в конечном счете, приводит к обрушению всего сооружения или непропорционально большой его части. Причиной разрушения может быть любая из множества аварийных ситуаций, которые не рассматриваются в обычном проектировании. В то же время землетрясения, пожары, сильные ветры, включенные в строительные нормы, также не должны приводить к прогрессирующему обрушению.

В то время как вопросы защиты от прогрессирующего обрушения крупнопанельных зданий изучены, разработаны методики расчёта и рекомендации по конструированию, а многочисленные примеры аварий подтверждают их эффективность, аналогичных решений для монолитных и сборно-монолитных зданий и сооружений в России нет.

Согласно нормам [1], для всех железобетонных монолитных зданий при проектировании рекомендуется выполнять оценку сопротивляемости конструктивной системы прогрессирующему обрушению. Методик проведения оценки СП не приводит, однако предписывает производить расчет конструктивных систем методом конечных элементов с использованием специальных сертифицированных в России компьютерных программ, согласованных с НИИЖБ: Лира, Мономах, STARK-ES и других.

Расчет здания в программных комплексах следует выполнять с учётом физической и геометрической нелинейности жесткостных характеристик элементов, что обеспечивает наибольшую достоверность расчёта и снижение дополнительных материалозатрат. Для расчета следует использовать пространственную расчетную модель. В модели могут учитываться элементы, являющиеся ненесущими в условиях нормальной эксплуатации (наружные стены и т.п.), которые в случае чрезвычайной ситуации (ЧС) могут воспринимать аварийные нагрузки и активно участвовать в перераспределении усилий в элементах конструктивной системы. Разработчики программных комплексов SCAD и Лира предлагают свои методики расчёта, однако достоверность получаемых результатов пока не подтверждена и требует проведения исследований в этом направлении.

Ранее были разработаны нормативные документы, содержащие методики и примеры расчёта с помощью кинематического метода теории предельного равновесия и рекомендации по защите от прогрессирующего обрушения (далее – Рекомендации) следующих типов зданий: крупнопанельные здания, жилые здания с несущими кирпичными стенами, жилые здания каркасного типа, монолитные жилые здания [2], высотные здания, большепролетные сооружения. Рекомендации имеют схожее содержание, отличаясь лишь незначительно в разделе конструктивных решений, где учитывается конкретная специфика каждого типа зданий. Предложенная методика расчёта кинематическим методом теории предельного равновесия крайне трудоёмка в применении на практике. При рассмотрении сложных вариантов объемно-планировочных решений, наиболее опасную форму разрушения надо устанавливать перебором всех возможных вариантов схем локального разрушения. В Рекомендациях нет методики оценки прогибов и перемещений плит.

Необходимость разработки Рекомендаций появилась после ужесточения противопожарных требований в г. Москва. Мероприятия по выполнению требований противопожарных норм защищают отдельные элементы здания только от воздействия пожара, а в случае других ЧС могут оказаться бесполезными. Поэтому в московских нормах было принято положение о необходимости защиты здания в целом от прогрессирующего обрушения при ЧС любого типа, а требования по огнестойкости отдельных конструктивных элементов трактуются с учетом защищенности всего здания от прогрессирующего обрушения.

Специалисты разных стран сходятся во мнении, что устойчивость здания против прогрессирующего обрушения следует обеспечивать комплексом средств:

- превентивными мерами безопасности;
- рациональными конструктивно-планировочными решениями здания с учетом возможности возникновения аварийной ситуации;
- мерами, обеспечивающими неразрезность конструктивной системы здания;
- применением материалов и конструктивных решений, обеспечивающих развитие в элементах конструкций и их соединениях пластических деформаций;
- мероприятиями, аналогичными защите зданий от сейсмических воздействий.

В Рекомендациях вопрос конструктивно-планировочных решений не рассмотрен. Нет единого алгоритма по проектированию зданий и сооружений, защищенных от прогрессирующего обрушения. Нет единой методики расчета в программных комплексах. Практически отсутствуют опубликованные за последнее время в Руденко Д.В., Руденко В.В. Защита каркасных зданий от прогрессирующего обрушения

РФ статьи на тему живучести зданий. Практика проектирования свидетельствует об острой необходимости простых инженерных решений, не требующих детального анализа каждой конкретной конструкции.

Предлагается следующий алгоритм расчёта конструкций на прогрессирующее обрушение (рис. 1).

Расчет устойчивости здания против прогрессирующего обрушения необходимо производить на особое сочетание нагрузок, включающих постоянные и длительные нагрузки с их нормативными значениями. Прочностные и деформативные характеристики материалов конструкции принимаются равными их нормативным значениям.

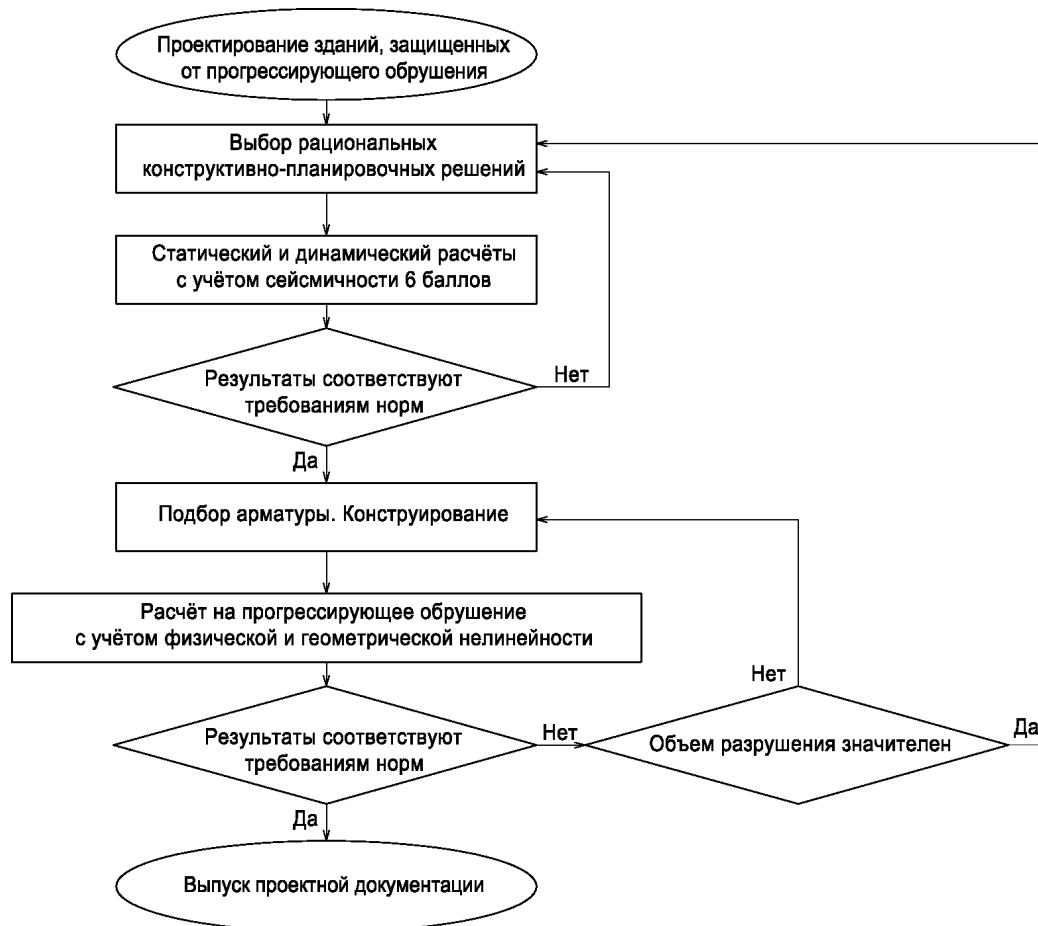


Рисунок 1. Алгоритм расчёта конструкций на прогрессирующее обрушение

Расчётом должны быть проверены все наиболее опасные схемы локального разрушения. При этом величины деформаций и ширина раскрытия трещин в конструкциях не регламентируются.

Колонны являются ключевыми элементами зданий и сооружений каркасного типа. При регулярной сетке осей разрушение колонны приводит к увеличению пролёта конструкции над разрушенной колонной в два раза. Момент в сечении конструкции над разрушенной колонной может возрасти до четырёх раз. Прямой подход к защите таких конструкций от прогрессирующего обрушения, описанный в различных нормативных документах, в том числе и зарубежных [3, 4], приводит к увеличению расхода арматуры в 2-2,5 раза.

В качестве способа, позволяющего защитить каркасные здания от обрушения без значительного увеличения расхода материалов, предлагается использование жестких блоков (аутриггерных этажей) по высоте здания. Колонны каркаса при этом следует рассчитывать не только на внецентренное сжатие при их нормальной работе, но и на растяжение, возникающее во время ЧС. В таком случае стены жесткого блока начинают работать как балки-стенки, воспринимая усилия от растянутой колонны, а перекрытия этажей оказываются подвешенными. Такой подход позволяет значительно снизить объём разрушаемых конструкций.

В качестве примера рассмотрены две конструктивные схемы здания: обычное 20-тиэтажное каркасное здание с шагом колонн 6 на 6 метров и аналогичное здание, верхний технический этаж которого представляет собой жесткий блок. Общий вид моделей представлен на рис. 2-3.

Произведен расчёт 6 моделей в ПК SCAD, 9 моделей с учётом физической и геометрической нелинейности в ПК ЛИРА, 3 расчёта кинематическим методом теории предельного равновесия. Каждая из моделей учитывает обрушение одной из трёх рассматриваемых колонн первого этажа.

Результаты проверки схем на прогрессирующее обрушение в ПК SCAD 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 (зелёные), и вышедшие из строя ($K_{\max} \geq 1$ — красные). В трехцветной шкале третий цвет (жёлтый) используется для указания элементов, попавших в интервал неопределённости, то есть таких, которые, по мнению расчетчика, с одинаковой вероятностью могут быть отнесены как к выбывшим из строя, так и к работающим. Значение интервала неопределённости назначается пользователем.

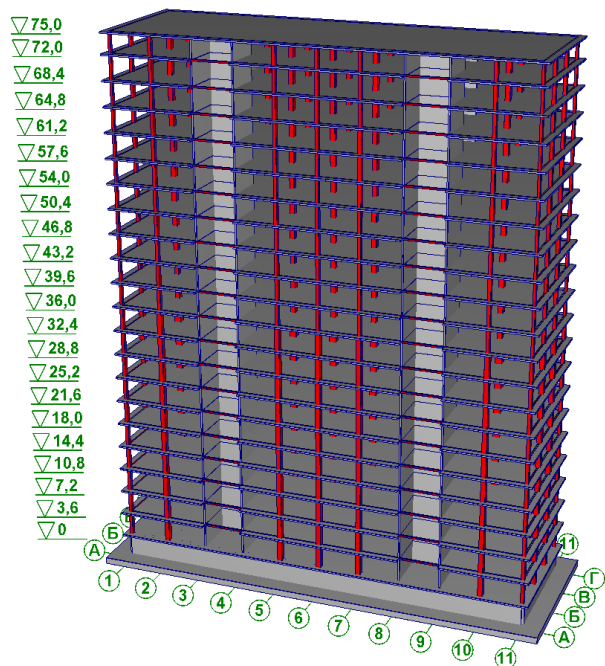


Рисунок 2. Модель без жесткого блока

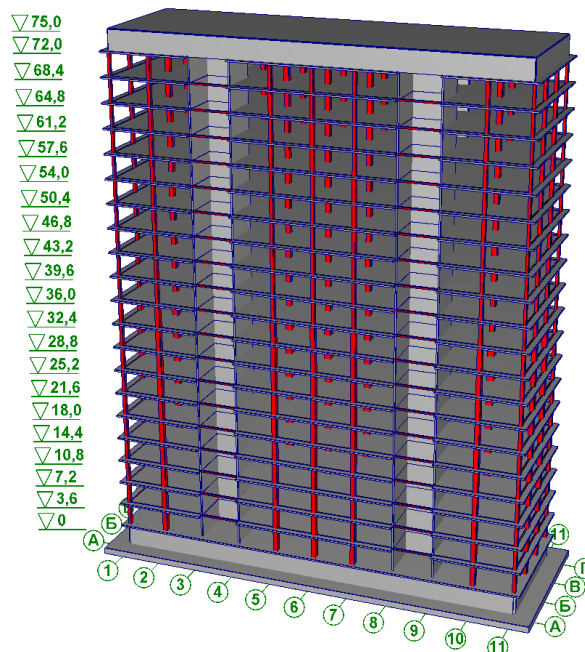


Рисунок 3. Модель с жестким блоком

Результаты обрушения для схем без жесткого блока (слева) и схем с жестким блоком (справа) представлены на рис. 4-5.

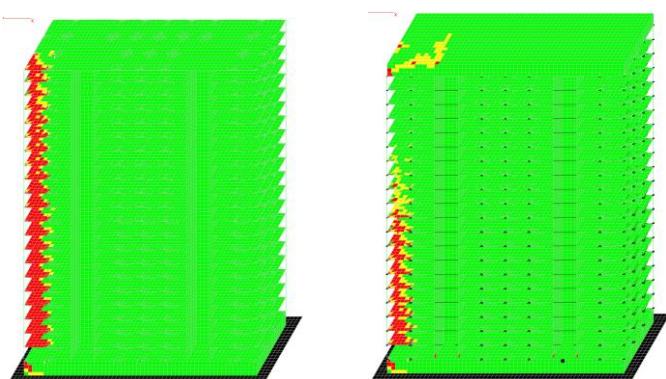


Рисунок 4. Разрушение угловой колонны

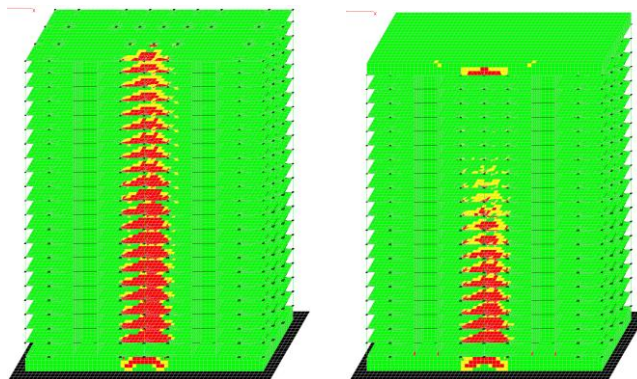


Рисунок 5. Разрушение колонны крайнего ряда

Методика расчета конструкций на прогрессирующее обрушение, реализованная в ПК SCAD, требует дальнейшего развития и дополнения, т.к. не позволяет учитывать физическую нелинейность работы материалов железобетонных конструкций, не учитывает мембранный эффект работы арматуры, не позволяет оценить перемещения. ПК отображает только те элементы, которые отказали на первом же шаге процесса распространения обрушения. Для определения элементов, выходящих из строя на втором и последующих шагах, требуются дополнительные действия расчётчика. Расчёт производится в квазистатике – для учёта мгновенности приложения нагрузки от расчётчика требуется указать коэффициенты динамичности, вычисление которых без использования ПК трудоемко и может оказаться неточным. Таким образом, целесообразно рассмотреть возможность перехода от квазистатических расчётов к динамическим расчетам с использованием вместо сосредоточенных усилий – равномерно распределенных масс.

Главным преимуществом ПК ЛИРА по сравнению с ПК SCAD является реализация расчётов с учётом физической нелинейности работы материала. Методика расчётов на прогрессирующее обрушение в ПК ЛИРА следующая.

1. После формирования расчётной схемы с учётом граничных условий необходимо указать тип конечных элементов и их жесткости. Для учёта физической и геометрической нелинейности выбираются соответствующие типы конечных элементов (например, 410, 442, 444). При задании жесткостей отмечается необходимость учёта нелинейности, задаются параметры материала конструкции и параметры арматуры.

2. К расчётной модели прикладываются два нагружения: первое моделирует постоянные и длительные нагрузки на конструкцию, второе позволяет учесть коэффициент динамичности. Для этого в

верхний узел разрушенной колонны нужно задать усилие, составляющее определенную часть от усилия в этой колонне, возникающего при действии нагрузок из первого нагружения.

3. С помощью «Монтажных таблиц» моделируются стадии обрушения. Формируется две стадии. В первую входят все элементы конструкции без исключения, во вторую – все, за исключением разрушаемой колонны.

4. Для выполнения нелинейного расчета системы с учетом процесса монтажа необходимо задать количество нелинейных нагружений, равное количеству стадий монтажа. Для второго нелинейного нагружения необходимо учитывать предыдущее нагружение.

Результатом расчёта являются усилия, напряжения и перемещения на каждом из этапов приложения нагрузки, картины трещин в стенах и плитах, места образования пластических шарниров, информация об элементах, разрушающихся в первую очередь. Также имеется возможность определить нагрузку, при которой разрушается первый элемент конструкции, и по ней судить об имеющихся запасах по несущей способности.

-112.100 -94.004 -76.021 -58.037 -40.054 -22.070 -4.083

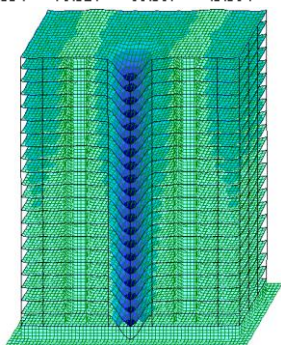


Рисунок 6. Деформации по Z для схемы без жесткого блока

-55.698 -47.063 -38.483 -29.903 -21.323 -12.744 -4.160

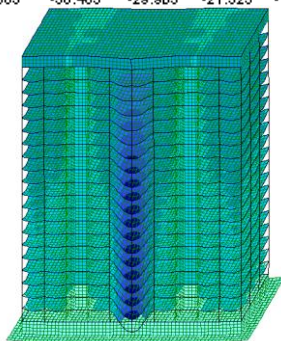


Рисунок 7. Деформации по Z для схемы с жестким блоком

При применении квазистатического метода расчета определение коэффициента динамичности остаётся на совести инженера. Пример результатов по перемещениям для двух схем при разрушении колонны крайнего ряда представлены на рис. 6-7. Максимальные значения перемещений снизились в 2 раза: 112 мм для схемы без жесткого блока против 56 мм для схемы с жестким блоком.

Результаты расчёта кинематическим методом теории предельного равновесия близки к результатам, полученными в ПК ЛИРА, что подтверждает возможность использования ПК для расчётов такого типа.

В заключение необходимо отметить, что при традиционном проектировании выполняется поэлементный расчет, т.е. обеспечивается требуемая надежность каждого отдельного элемента. При этом надежность понимается, как свойство сооружения выполнять свое функциональное назначение с необходимым качеством в течение предусмотренного срока эксплуатации. Такая поэлементная проверка называется методом наислабейшего элемента и присваивает всей конструкции топологию последовательного соединения элементов, что в действительности не всегда так и может свидетельствовать об имеющихся запасах несущей способности. Поскольку определить надежность всей конструкции не представляется возможным в виду значительной трудоемкости, то надежность всего сооружения трактуется через надежность ее отдельных элементов. В результате нельзя дать ответ о фактической надежности запроектированного сооружения.

С распространением программных комплексов на основе метода конечных элементов у рядовых инженеров появился мощный и доступный инструмент для исследования и детального анализа работы конструкции. Есть возможность быстро и без значительных затрат времени сравнить несколько конструктивных схем и выбрать наиболее рациональную. Сегодня необходим пересмотр методологии проектирования с учетом новых возможностей систем автоматизированного проектирования для создания новой единой и четкой концепции нормативной базы [5].

Литература

1. СП 52-103-2007. Железобетонные монолитные конструкции зданий. М., 2007.
2. Рекомендации по защите монолитных жилых зданий от прогрессирующего обрушения. М., 2005.
3. Тихонов И.Н. Армирование элементов монолитных железобетонных зданий. М., 2007.
4. UFC 4-023-03. Unified Facilities Criteria (UFC). Design of Buildings to Resist Progressive Collapse. Department of Defense USA, 2005.
5. Кудишин Ю.И., Дробот Д.Ю. Методика расчета строительных конструкций на единичную живучесть. М., 2009.

*Дмитрий Вячеславович Руденко, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Эл. почта: 3952800@gmail.com