

УДК 624.046.5: 69.059.2: 699.88

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОГРЕССИРУЮЩЕГО ОБРУШЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ РЕАЛЬНЫХ ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ

*к. т. н., доцент, докторант Барабаш М. С.,
аспирант Ромашикина М. А.*

ГВУЗ «Национальный авиационный университет», г. Киев

Введение. Определяющее значение при проектировании имеет методика моделирования зданий с учетом реальной работы конструкций, нелинейных свойств материалов, учета процесса поэтапного возведения, а также построение корректной конструктивной схемы здания с учетом изменения напряженно-деформированного состояния в течении жизненного цикла. [1]. Учет процессов жизненного цикла оказывает значительное влияние на формирование адекватной расчетной компьютерной модели здания и на выбор рационального метода расчета, позволяющего получить реальные данные о напряженно-деформированном состоянии (НДС) несущих конструкций [2].

В статье предлагаются подходы, позволяющие перейти от ранее принятой концепции расчета (расчетная схема – НДС) к современной – моделирование процессов жизненного цикла (процесс возведения, процесс нагружения и др.). В частности, предлагается методика моделирования зданий на прогрессирующее обрушение с учетом приспособляемости конструкций.

Обзор литературы по теме исследования. Вопросам разработки методов предотвращения прогрессирующему обрушению посвящены труды Алмазова В.О. [3], Мутока Кяло, Плотникова А.И., Расторгуева Б.С. [4], работы сотрудников МНИИТЭП Шапиро Г.И., Гурьева В.В., Эйсмана Ю.А. [5], зарубежных ученых Powell G. [6], Gilmour J.R. и Virdi K.S. [7], Kaewkulchai G. и Williamson E.B. и [8], Pretlove A.J., Ramsden M. и Atkins A.G. [9], Izzudin B.A., Vlassis A.G., Elghazouli A.Y., Nethercot D.A. [10] и других ученых. В работах показано влияние динамического эффекта при прогрессирующем обрушении, которое уменьшается при увеличении пластических деформаций.

При участии автора разработано дополнение Е «Методы расчета высотных зданий на сопротивление прогрессирующему обрушению» к ДБН Б.2.2-24:2009. С введением в действие нормативных документов

[11,12,13], сформированы требования, согласно которым должен осуществляться процесс проектирования здания. Одним из таких требований является расчет здания на прогрессирующее обрушение. Такой расчет относится к аварийной ситуации, и подразумевает локальное обрушение или повреждение отдельных элементов несущих конструкций в пределах одного этажа или части перекрытия (ограниченной площадью до 80 м^2 или диаметром до 10м), которое не ведет к полному разрушению всей конструкции и здания в целом. При этом в отдельных элементах конструкций допускается развитие трещин и пластических деформаций в арматуре. Расчет прочности и устойчивости каркаса сооружения проводится на аварийное сочетание нагрузок. При этом в соответствии с п.Е.2 по [11] – предельные перемещения конструкций не регламентируются, необходимо оценить общую устойчивость здания в целом.

Постановка задачи. Моделирование прогрессирующего обрушения необходимо для исследования живучести конструкции, возможности и механизма ее приспособления при аварийном выходе из строя отдельных конструктивных элементов. Такой анализ может быть сделан в рамках нелинейного динамического расчета, однако его выполнение при массовом проектировании в настоящее время не представляется возможным ввиду большой сложности и ресурсоемкости расчета. В то же время, можно считать несостоятельной и попытку моделирования процесса «прогрессирующего» разрушения конструкции на основе линейно–упругого статического расчета, предпринятую в некоторых работах и программных комплексах. Для решения этого класса задач предлагается математическое моделирование процесса нагружения на основе уточненного шагового метода, как основного метода при моделировании процессов жизненного цикла конструкций.

В данной работе моделирование «форс–мажорной» аварийной ситуации предлагается проводить по следующей схеме. На первом этапе выполняется расчет конструкции в эксплуатационной стадии или в нескольких монтажных и эксплуатационных стадиях, с учетом истории возведения и нагружения конструкции, предшествующих локальному разрушению. При этом учитывается физическая и геометрическая нелинейность работы конструкции. Напряженно–деформированное состояние первого этапа является стартовым для второго этапа, на котором выполняется расчет схемы с выключенными из работы (удаленными) элементами. Нагрузкой на втором этапе являются усилия в удаленных элементах, увеличенные на коэффициент, учитывающий динамику процесса. Расчет также

необходимо проводить с учетом физической и геометрической нелинейности. Если при этом окажется, что некоторые элементы модели не удовлетворяют условию прочности (т.е. разрушаются), то расчет продолжается аналогичным образом на следующей стадии без таких элементов. Расчет будет завершен либо локализацией процесса разрушения, либо полным разрушением несущей системы [14]. Однако следует заметить, что в большинстве случаев для предотвращения «прогрессирующего» обрушения конструкции необходимо обеспечить несущую способность всех ее элементов при начальных аварийных повреждениях. В этих случаях расчет будет остановлен на первой стадии второго этапа расчета и моделирование процесса «прогрессирующего» обрушения не потребуется.

Далее на реальных примерах рассматривается методика оценки устойчивости каркасов высотных зданий при обрушении разных типов: обрушение опорной колонны нижнего этажа; расчет плиты на аварийную посадку либо крушение вертолета о колонну вертолетной площадки.

Описание исследования. При реализации расчетов на прогрессирующее обрушение, необходимо принимать во внимание условность исходных предпосылок, заключающаяся в следующем:

- отсутствует достоверная информация о месте и причине возникновения процесса и характере разрушения;
- реальные параметры предельных разрушающих характеристик материалов, как правило, отличаются от условий прочности, принятых в нормах, поэтому в расчетных программных комплексах, например, таких как ЛИРА-САПР (подсистема МОНТАЖ), при физически-нелинейном расчете, кроме нормируемых данных о материалах (бетон, арматура), предусматривается задание произвольных расчетных значений параметров прочности (в том числе по результатам натуральных наблюдений). 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.

Для оценки устойчивости здания против прогрессирующего обрушения необходимо рассматривать лишь наиболее опасные расчетные схемы разрушения.

Устойчивость к прогрессирующему обрушению проверяется нелинейным расчетом на особое (аварийное) сочетание нормативных

нагрузок и воздействий, включающее нормативные постоянные и длительные нагрузки, а также воздействие гипотетических локальных разрушений несущих конструкций. Допускается в первом приближении после определения зоны локального обрушения, например по подсистеме «ЛИТЕРА» в программном комплексе ЛИРА-САПР (ПК ЛИРА-САПР), выполнять расчет конструкций с учетом демонтажа разрушенных элементов при пониженных модулях упругости несущих элементов: вертикальных с коэффициентом - $0.6E_0$, плит перекрытия (покрытия) - $0.3E_0$. Перемещения элементов конструкций и развитие трещин не ограничиваются, но коэффициент запаса при проверке устойчивости такой системы с демонтированными элементами должен быть более двух.

Коэффициенты надежности по нагрузкам следует принимать равными единице. За расчетные характеристики материалов принимаются их нормативные значения. Кроме того, расчетные сопротивления умножают на повышающие коэффициенты условий работы, учитывающие малую вероятность аварийных воздействий и рост прочности бетона после возведения здания, а также возможность работы арматуры за пределом упругости. Такая возможность введения поправочных коэффициентов к прочности материала и модулю упругости на различных стадиях монтажа и демонтажа реализована в расчетном процессоре ПК ЛИРА-САПР (подсистема МОНТАЖ).

Минимальная площадь продольной и поперечной арматуры в железобетонных перекрытиях и покрытиях должна быть не менее 0.25% от площади бетона, при этом арматура должна быть непрерывной и стыковаться в соответствии с требованиями по проектированию железобетонных конструкций.

Так как предусмотреть все сценарии прогрессирующего обрушения невозможно то, ключевым пунктом в расчетах на аварийное обрушение является выбор и утверждение совместно с конструктором и заказчиком возможных сценариев обрушения, максимально приближенных к реальным условиям расположения объекта на местности, например:

- при расположении здания рядом с транспортными путями расчет сооружения выполняется при удалении крайних колонн;
- при наличии вертолетной площадки, расчет выполняется на обрушение участка плиты;
- при наличии в сооружении или рядом газо-распределительных станций выполняется расчет на взрыв газа;

- при наличии подпорных стен и других защитных сооружений - расчет выполняется на обрушение участка этих сооружений.

При этом, учитывая требования ДБН В.2.2-24:2009 (Приложение Е)[11], допускается обрушение отдельных элементов на площади до 80м^2 :

- сечение удаляемых ЖБ элементов не должно быть более 0.9м^2 ;
- сечение удаляемых фибробетонных элементов должно быть не более 0.7м^2 ;
- сечение удаляемой жесткой арматуры не должно быть более 15%.
- перекрытие высотного сооружения должно быть рассчитано на восприятие участка вышерасположенного перекрытия площадью до 80м^2 с коэффициентом динамичности 1.5.

Рассмотрим реальный пример выполнения расчета на прогрессирующее обрушение конструкций высотного жилого комплекса с подземным паркингом. Общая высота здания $H=+84,3\text{м}$, $H_{\text{подвала}}=-4.3\text{м}$, фундаментная плита 1.5м . Для получения достоверных данных о напряженно-деформированном состоянии (НДС) высотного здания расчет выполнен с учетом поэтапности возведения и с учетом нелинейной работы материалов в программном комплексе ЛИРА-САПР (рис.1).

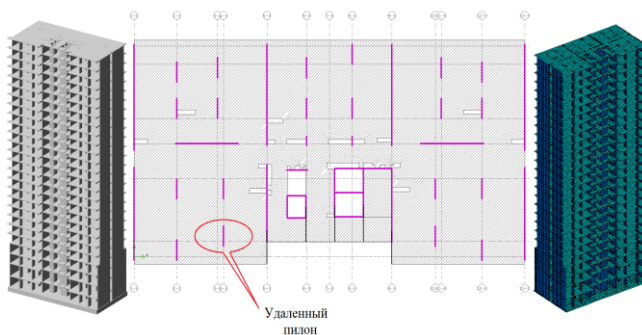


Рис.1. Пространственная схема здания, планы этажей и конечно-элементная схема

Для оценки устойчивости здания против прогрессирующего обрушения рассмотрены вариант разрушения одного из пилонов сечением $50\times 180\text{см}$ (площадь 0.9м^2) в средней части здания с максимальным пролетом плиты 4.6 м . После удаления пилона изменяет конструктивную схема и характер работы пилонов

примыкающих к месту разрушения. Пролет становится равным 8.85 м, плита «зависает» в месте удаления пилона (рис.1).

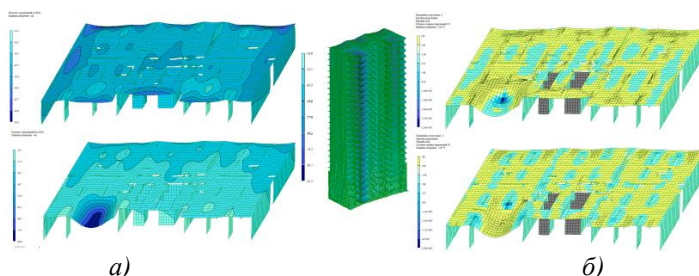


Рис.2 Конечно-элементная схема каркаса (а) и неупругие деформации (б) при обрушении пилона, смоделированные в ПК ЛИРА-САПР

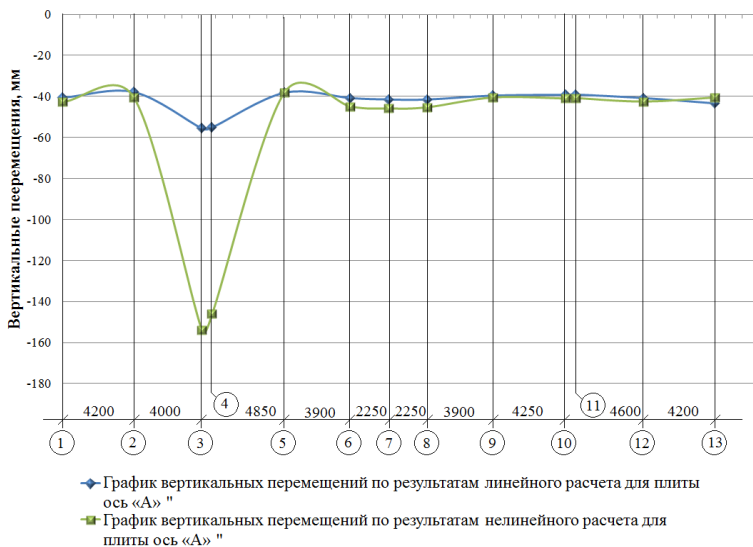


Рис.3 Графики вертикальных перемещений при обрушении пилона для плиты по оси «А»

Так максимальное перемещение по результатам линейного расчета составило 41,5 мм, а по нелинейному расчету - 154 мм (рис. 3). Перемещения по результатам нелинейного расчета больше в 3,7 раза, чем по результатам линейного расчета. Это свидетельствует о том, что при линейном расчете нельзя учесть реальную работу несущих элементов конструкции при возникновении аварийных ситуаций.

В качестве второго примера рассмотрим здание торгово-офисного комплекса с объектами общественного назначения и вертолетной площадкой. Фундаментная плита 1.35м, монолитный каркас +138.9м.

Производится расчет шаговым методом на прогрессирующее обрушение плиты перекрытия верхнего технического этажа.

$$\{\sigma_i\} = \{\sigma_{i-1}\} + \{\Delta\sigma_i\}, \{\Delta\sigma_i\} = [D]_i \times \{\Delta\varepsilon\}_i, \quad (1)$$

где $[D]$ – переменная матрица упругопластичности элемента с трещинами на i -том шаге;

$\{\Delta\varepsilon\}$ – тензор приращения деформации;

$\{\Delta\sigma\}$ – тензор приращения напряжений.

Критерием разрушения конструкций могут служить геометрическая изменяемость системы на m -том шаге; лавинообразный рост деформаций и перемещений системы. При этом в ПК ЛИРА-САПР выдается сообщение «разрушение конструкции» и дальнейший процесс расчета прекращается.

Выполним расчет плиты на аварийную посадку либо крушение вертолета о колонну вертолетной площадки. Далее проводится анализ трещинообразования на участке обрушения верхнего перекрытия (рис. 4). На рисунках видно, активное трещинообразование расположено в наиболее нагруженном участке плиты.

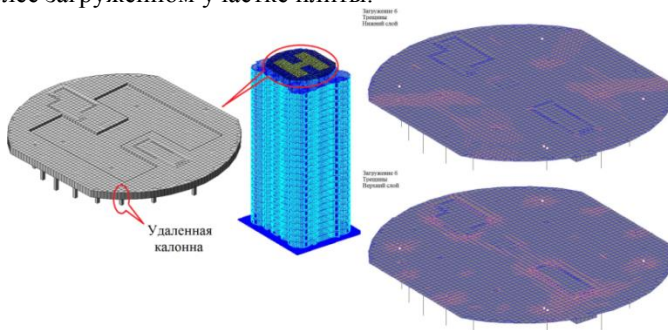


Рис. 4 Расчетная модель и трещинообразование в плите перекрытия

Приведенный расчет плиты перекрытия в физически нелинейной постановке показывает, что в плите развиваются зоны трещин и образуются пластические шарниры. В нижней арматуре плиты в центре пролета зафиксирована текучесть арматуры. При этом в верхней зоне плиты над колоннами также развиваются верхние трещины, но разрывов арматуры в плите не зафиксировано. Это свидетельствует, что эксплуатационная пригодность плиты не

обеспечивается, но дальнейшее прогрессирующее лавинообразное обрушение плит не происходит.

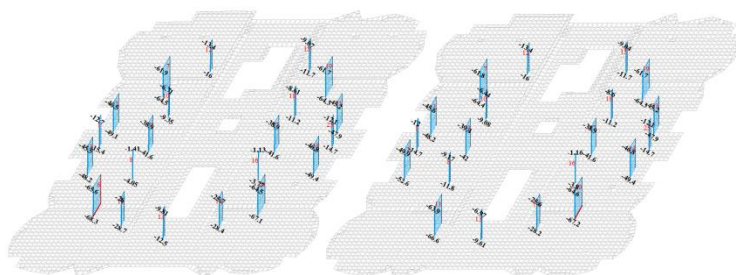


Рис. 5 НДС колонн в зоне аварийной ситуации

Таблица 1

Усилия в колоннах при нормальной эксплуатации и после аварийного воздействия

№ колонны	Усилия	
	Усилия в колоннах при нормальной эксплуатации N, (т)	Усилия в колоннах после аварийного воздействия N, (т)
1	- 15.379	- 14.670
2	- 48.180	- 52.551
3	- 49.132	- 48.212
6	-68.287	-
7	- 64.499	- 64.447
8	- 4.049	- 11.811
9	- 41.558	- 42.032
10	- 9.348	- 9.082
11	- 28.658	- 66.584
12	- 16.021	- 16.045
13	- 12.454	- 9.615
14	- 28.380	- 28.246
15	- 11.710	- 11.682
16	- 3.774	- 3.803
17	- 41.585	- 41.586
18	- 11.246	- 11.245
19	- 64.303	- 64.300
20	- 67.109	- 67.219
23	- 47.853	- 47.852

Продолжение табл. 1

24	- 49.441	- 49.443
25	- 14.724	- 14.722

После удаление колонны №6 возникло перераспределение усилий на ближние колонны №11, 8, 2, (таблица 1), но прочность этих колонн обеспечивается.

Заключение.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы.

При проектировании высотных зданий необходимо создавать конструктивные предпосылки для обеспечения приспособляемости конструкций к различным ситуациям, в том числе и форс-мажорным. Для решения этих задач необходимо рассчитывать конструкции в нелинейной постановке. Шаговые методы решения нелинейных задач в этих случаях наиболее приемлемы. При учете критерия безопасности и максимального предотвращения аварийных ситуаций необходимо стремиться решать эти вопросы наиболее экономичными способами. Реализованные в программном комплексе ЛИРА-САПР методика физически-нелинейного расчета конструкций с трещинами позволяет выполнять оценку устойчивости и устойчивой прочности каркаса при прогрессирующем обрушении.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Барабаш М. С. Исследование вопросов живучести строительных конструкций при аварийных воздействиях / М. С. Барабаш, А. С. Городецкий // Строительство, материаловедение, машиностроение // Сб. научн. Трудов. – Дн-вск: ПГАСА, 2010. – № 56. – С.123 - 128.
2. Барабаш М. С. Некоторые аспекты расчета зданий на устойчивость к прогрессирующему разрушению / М. С. Барабаш, А. С. Городецкий // Строительство, материаловедение, машиностроение // Сб. научн. Трудов. – Дн-вск: ПГАСА, 2009. – №. 50. – С. 157 - 162.
3. Leyendecker, E.V. and Ellingwood, B.R., 1977, "Design Methods for Reducing the Risk of Progressive Collapse in Buildings," NBS Building Science Series 98, National Bureau of Standards, Washington, DC.
4. McGuire, W., 1974, "Prevention of Progressive Collapse," Proceedings of the regional Conference on Tall Buildings, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand.

5. Fintel, M. and Schultz, D.M., 1976, "Philosophy for Structural Integrity of Large Panel Buildings," Journal of the Prestressed Concrete Institute, Vol.21, No.3, pp.46-69.
6. Алмазов В.О. Сопротивление прогрессирующему разрушению: расчетные и конструктивные мероприятия. Доклад ЦНИИСК, 2009.
7. Расторгуев, Б. С., Мутко К. Н. Деформирование конструкций перекрытий каркасных зданий после внезапного разрушения одной колонны. // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений, 2006/1, с.12-15.
8. Шапиро Г.И., Гурьев В.В., Эйман Ю.А. Методика расчета монолитных жилых зданий на устойчивость против прогрессирующего обрушения. - М.: МНИИТЭП, 2004. - 40 с.
9. Powell, Graham. Progressive Collapse: Case Studies Using Nonlinear Analysis. SEAOC Annual Convention, Monterey, August 2004.
10. Gilmour J.R. and Virdi K.S. Numerical modelling of the progressive collapse of a framed structures as a result of impact or explosion. 2nd int. PhD. Symposium in civil engineering, Budapest 1998 Kaewkulchai G. and Williamson E.B. Beam element formulation and solution procedure for dynamic progressive collapse analysis, Journal "Computer and Structures" 82 (2004), Pp. 639-651.
11. Общие принципы обеспечения надежности и конструктивной безопасности зданий, сооружений строительных конструкций и оснований: ДБН В.1.2-14-2009. – [Введен в действие с 01-12-2009]. – К.: Минрегионстрой Украины, 2009. – 45 с. – (Государственные строительные нормы Украины).
12. Рекомендации по защите монолитных жилых зданий от прогрессирующего обрушения. - М.: Москомархитектура, 2005. - 38с.
13. Проектирование высотных жилых и гражданских сооружений: ДБН В.2.2-24:2009. – [Введен в действие с 01-09-2009]. – К.: Минрегионстрой Украины, 2009. – 103 с. – (Государственные строительные нормы Украины).
14. Барабаш М. С. Обеспечение конструктивной безопасности при проектировании высотных зданий с использованием ПК ЛИРА-САПР/ М. С. Барабаш, М. А. Ромашкина // Сборник научных трудов Международного научного семинара, г. Курск, 19-20 сентября 2013: Перспективы развития программных комплексов для расчета несущих систем зданий и сооружений. – Курск: ЮЗГУ, 2013 – С. 73 – 82