

Особенности расчета на прогрессирующее обрушение каркаса уникального здания многофункционального комплекса

Г.М. Кравченко, Е.В. Труфанова, А.К. Кущенко, И.В. Быченко

Донской государственный технический университет

Аннотация: Расчет на прогрессирующее обрушение с вариацией и сравнением различных сценариев осуществлён для каркаса уникального высотного здания многофункционального комплекса. На первом этапе произведен расчет в квазистатической постановке, определены максимальные прогибы для двух сценариев разрушения. Требования по состоянию ограниченной работоспособности в условиях прогрессирующего обрушения выполняется. На втором этапе произведен расчет в динамической постановке. Предварительно выполнен модальный анализ каркаса с целью определения форм колебаний, которые будут соответствовать предполагаемым деформациям сооружения в случае возникновения и развития процесса прогрессирующего обрушения. Установлено, что максимальный прогиб плиты при расчете в динамической постановке на 27.6% больше, чем в квазистатической. Остаточный прогиб после затухания колебательного процесса на 4.6% меньше, чем в статическом расчете. Следовательно, объект исследования является безопасным с точки зрения возможности возникновения экстренной ситуации, сопровождающейся частичным разрушением несущих конструкций.

Ключевые слова: прогрессирующее обрушение, метод конечных элементов, параметрическая архитектура, уникальные здания, динамическая постановка

Разработку концептуальных решений для уникальных зданий и сооружений следует осуществлять как на этапе выбора формы объекта, так и при рассмотрении характеристик напряженно-деформированного состояния его каркаса [1-3]. Цифровое моделирование позволяет рассмотреть множество вариантов и определить рациональные конструктивные решения [4-6].

Объектом исследования является уникальное здание многофункционального комплекса высотой 120 м, образованное многовариантным способом совмещения аналитических поверхностей. Архитектурный концепт объекта получен на основании исследования эволюции формообразования аналитической поверхности с дальнейшим анализом рационального способа совмещения нескольких объектов [7]. В качестве формы, образующей объект параметрической архитектуры, принята

закрученная поверхность с конгруэнтными эллипсами в параллельных плоскостях.

Главной задачей исследования является расчет на прогрессирующее обрушение с вариацией и сравнением различных сценариев динамического воздействия на сооружение [8-10].

Конечно-элементная модель объекта параметрической архитектуры по авторскому концепту «Закрученные лепестки» реализована в ПК ЛИРА САПР. Данный концепт получен путем совмещения пяти аналитических поверхностей, заданных двумя параметрическими уравнениями (рис.1). При этом самой высокой частью является центральная башня, к которой примыкают цилиндрические поверхности.

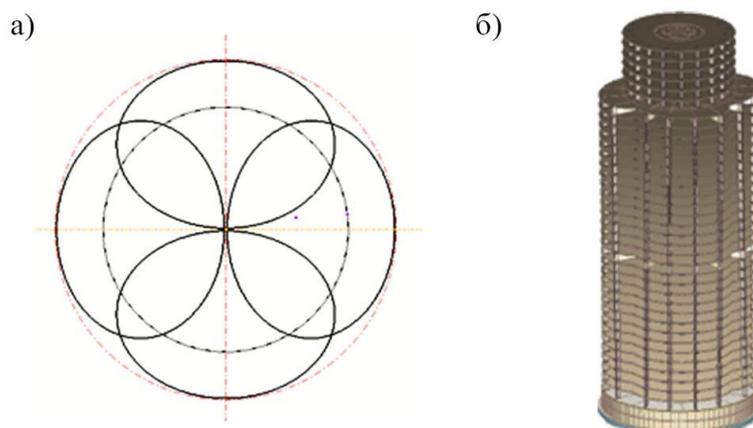


Рис.1. Объект параметрической архитектуры по концепту «Закрученные лепестки»:

а) сопряжение форм в плане, б) архитектурная модель

На предварительном этапе выполнен модальный анализ каркаса. Установлено, что первая и вторая форма колебаний имеют поступательный характер, третья – крутильный, что соответствует нормам проектирования. Распределение главных мод колебаний позволяет судить о том, что жесткостные характеристики системы подобраны оптимально, введение дополнительных диафрагм жесткости не требуется, а каркас обладает достаточной вертикальной жесткостью. Выполнен анализ напряженно-

деформированного состояния каркаса на действие постоянных, временных и полезных нагрузок, что является необходимым базисом для проектируемого объекта [11].

Анализ реакции каркаса уникального многофункционального комплекса на чрезвычайные воздействия, в частности на прогрессирующее обрушение, является главной задачей исследования. Это позволит выявить наиболее неблагоприятный сценарий прогрессирующего обрушения и разработать мероприятия по эффективному противодействию чрезвычайной ситуации.

Расчетный программный комплекс ПК ЛИРА САПР позволяет успешно решать динамические задачи в упругой постановке. Для оценки динамического эффекта в расчетах конструкций целесообразно учитывать степень пластического деформирования конструкции.

На первом этапе выполнен расчет в квазистатической постановке с учетом этапности возведения сооружения, что позволяет корректно смоделировать накопления напряжений и деформаций конструкций. Применяется специальная система «Монтаж», позволяющая создавать монтажные стадии, имитирующие последовательное возведение сооружения и дальнейшее догружение полезными и эксплуатационными нагрузками.

Моделируется отказ несущего элемента, разрушение которого наиболее вероятно или будет нести самые неблагоприятные последствия.

По первому сценарию смоделирован отказ наиболее нагруженного элемента сооружения – колонны первого этажа (рис. 2а). Для сравнения выполнен расчет без назначения демонтажа одного из элементов расчетной схемы и с демонтажем колонны. Изополю прогибов плиты второго этажа для двух рассмотренных вариантов представлены на рисунке 2.

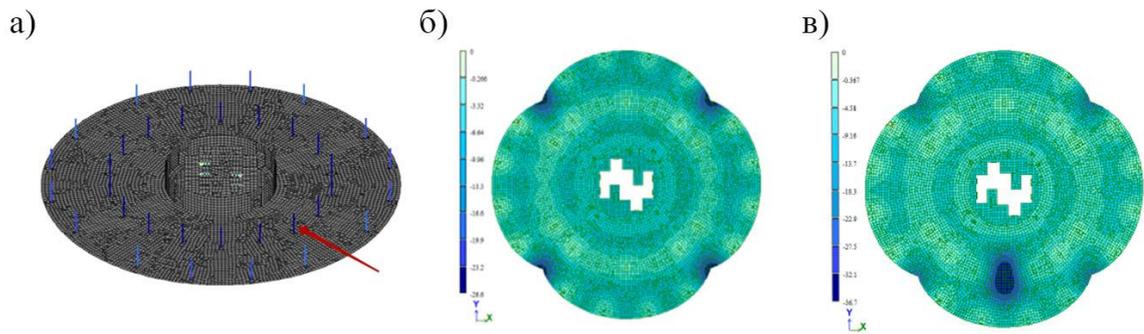


Рис.2: Моделирование первого сценария разрушения: а) схема первого этажа; б) изополя прогибов плиты 2 этажа на финальной монтажной стадии; в) изополя прогибов плиты 2 этажа на стадии демонтажа нагруженной колонны

Относительная деформация плиты при демонтаже колонны составила 36.7 мм, что является незначительной величиной для критического режима работы. Это позволяет сделать вывод, что в случае выхода указанной колонны из работоспособного состояния ближайшие несущие элементы конструктивной системы будут способны в полной мере воспринять нагрузки и не позволят произойти лавинообразному обрушению несущих компонентов здания.

По второму сценарию разрушения каркаса выбрана наиболее нагруженная колонна, являющаяся в схеме точкой опирания плиты на участке наибольшего пролета (рис. 3).

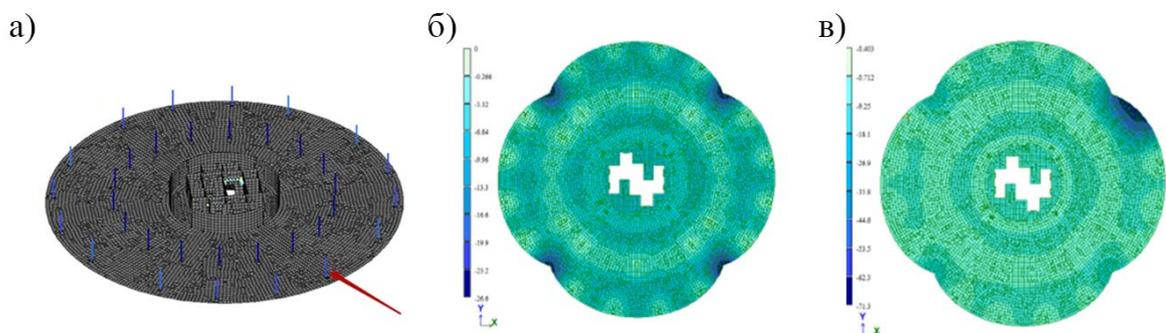


Рис. 3. Моделирование второго сценария: а) схема первого этажа; б) изополя прогибов плиты 2 этажа на финальной монтажной стадии в) изополя прогибов плиты 2 этажа на стадии демонтажа нагруженной колонны

Прогибы плиты на преддемонтажной стадии полностью аналогичны величинам по первому сценарию разрушения и составляют 26.6 мм, на следующей критической стадии в зоне с «разрушенной» колонной вырастают до значения 71.3 мм. Полученная величина в несколько раз превышает предельно допустимые значения, что говорит о том, что требования второго предельного состояния перестали выполняться. Однако, величина возникающих напряжений в зоне с «разрушенной» колонной соответствует состоянию рабочей арматуры в стадии пластического деформирования.

Исследована эффективность включения в каркас дополнительных аутригерных этажей и степень их влияния на показатели напряженно-деформированного состояния объекта параметрической архитектуры. В качестве критерия принята величина вертикальных деформаций после удаления несущего элемента при сравнении результатов расчета. Установлено, что прогибы плиты в конструктивной схеме без аутригерных этажей достигли значения 114 мм. Применение в схеме двух аутригерных уровней позволяет снизить прогибы наиболее деформируемого перекрытия на 37.8%.

На втором этапе расчет на прогрессирующее обрушение произведен в динамической постановке. В рамках исследования рассмотрена модель, предложенная по второму сценарию разрушения в квазистатической постановке. Для зданий параметрической архитектуры необходимо учитывать спектр частот более высоких порядков. Выполнен модальный анализ схемы с целью определения таких форм колебаний, которые будут соответствовать предполагаемым деформациям сооружения в случае возникновения и развития процесса прогрессирующего обрушения. Главные формы колебаний (ГФК) представлены на рисунке 4.

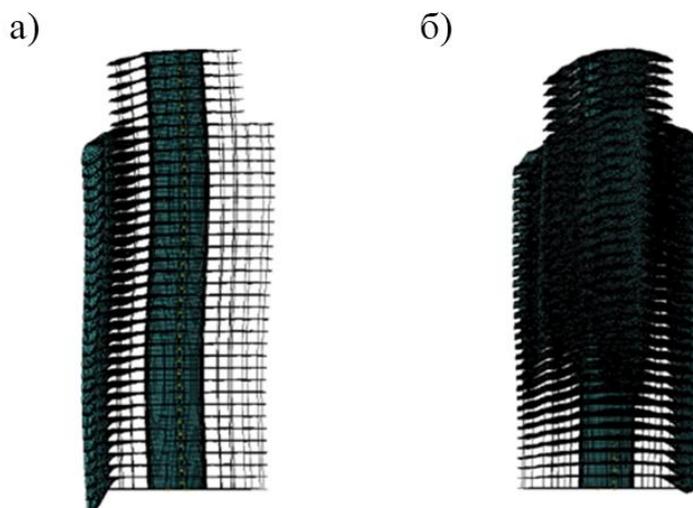


Рис. 4 Формы колебаний: а) ГФК 8, б) ГФК 13

На основе полученных частотных характеристик системы вычислены значения параметров демпфирования и назначены всем конечным элементам схемы во вкладке «Динамика» ПК ЛИРА САПР 2016. Прикладывается узловое вертикальное усилие величиной 1250 т в узел плиты 2 этажа, под которым удалена колонна. Эта процедура моделирует присутствие колонны до момента отказа несущего элемента. На рисунке 5 представлен принцип моделирования прогрессирующего обрушения в динамической постановке в модуле «Динамика плюс».

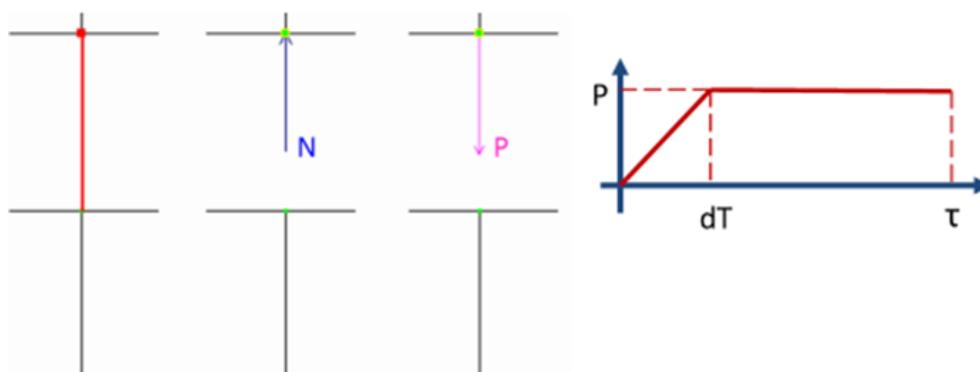


Рис.5. Принцип моделирования прогрессирующего обрушения в динамической постановке

Для проведения расчета принят шаг интегрирования 0.0037 с. При анализе графика изменения во времени вертикальной координаты рассматриваемого узла установлено, что на 39 шаге (0.144 с) возникает максимальный прогиб плиты с момента удаления колонны и возникновения колебаний, на 1080 шаге (3.996 с) – максимальный прогиб при установившемся режиме затухших колебаний (рис. 6).

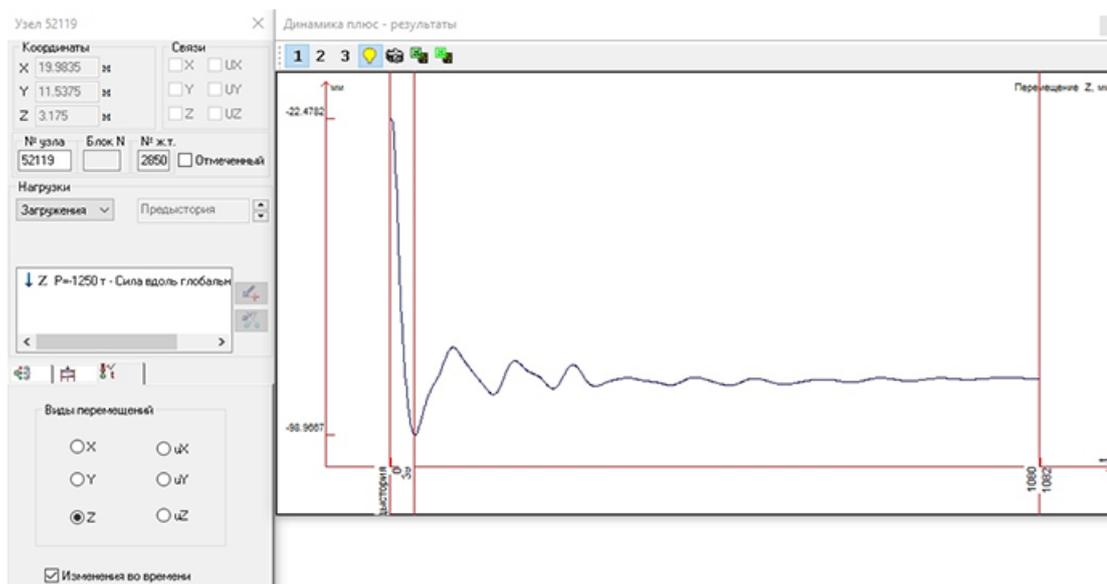


Рис. 6 График изменения во времени вертикальной координаты узла исследуемого сценария

Максимальный прогиб плиты при расчете в динамической постановке на шаге 39 составил 90.7 мм, что на 27.6% больше, чем в квазистатической постановке. Остаточный прогиб после затухания колебательного процесса составил 68 мм, что на 4.6% меньше, чем в статическом расчете.

Таким образом можно сделать вывод, что объект параметрической архитектуры как уникальное здание является устойчивым с точки зрения возможности возникновения экстренной ситуации, сопровождающейся частичным разрушением несущих конструкций. По отработанным сценариям каркас здания противодействует лавинообразному обрушению, а его

конструкции включаются в критические режимы работы и образуют схему «подвес».

Анализ эволюции формообразования и совмещения аналитической поверхности с конгруэнтными эллипсами в пределах единого архитектурного концепта, принятые архитектурные и конструктивные решения, в том числе введение аутригерных систем, обеспечивают комфортную и безопасную эксплуатацию здания параметрической архитектуры многофункционального комплекса.

Литература

1. Кравченко Г.М., Труфанова Е.В., Полетаев М.В. Уточнение методики определения ветровой нагрузки для объектов параметрической архитектуры // Инженерный вестник Дона, 2019. № 3 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N3y2019/5799/.
2. Кравченко Г.М. Труфанова Е.В., Кондрик И.В., Хатхоху И.А. Моделирование пульсационной составляющей ветровой нагрузки на каркас здания по нескольким методикам расчета // Инженерный вестник Дона, 2017. № 2 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2017/4084/.
3. Kumar E.K., Tamura Y., Yoshida A., Kim Y.C., Yang Q. Jnl. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 122 (2013), pp. 60-68.
4. Jencks Ch. The New Paradigm in Architecture, (seventh edition of The Language of Post-Modern Architecture), Yale University Press, London, New Haven, 2002. 228 p.
5. Schumacher P. (2009) A New Global Style for Architecture and Urban Design. AD Architectural Design - Digital Cities. Vol 79, No 4, 2009. doi: 10.1002/ad.912
6. Dautremont C., Jancart S., C Dagnelie C., Stals A. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 225 (2019). Pp.1-8. doi:10.1088/1755-1315/225/1/012071.

7. Кривошапко С.Н., Иванов В.Н., Халаби С.М., Аналитические поверхности: материалы по геометрии 500 поверхностей. Научное изд. М.: «Наука», 2006. с. 168, 382.

8. Shekastehband, B., Abedi, K., Dianat, N.: Experimental and numerical studies on the progressive collapse behavior of tensegrity systems. *Int. J. Space Struct.* 29 (2014). Pp. 9–24.

9. Руденко Д.В., Руденко В.В. Защита каркасных зданий от прогрессирующего обрушения // Инженерно-строительный журнал, СанктПетербург, 2009, №3. С. 39.

10. Алмазов В.О., Кхой Као Зуй. Динамика прогрессирующего разрушения монолитных многоэтажных каркасов. – М.: АСВ, 2013. – 128 с.

11. Агапов В.П. Метод конечных элементов в статике, динамике и устойчивости конструкций. //М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2004 – 248 с.

References

1. Kravchenko G.M., Trufanova E.V., Poletaev M.V. *Inzhenernyj vestnik Dona*, 2019. № 3 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N3y2019/5799/.

2. Kravchenko G.M., Trufanova E.V., Kondrik I.V., Hathohu I.A. *Inzhenernyj vestnik Dona*, 2017, № 2 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2017/4084/.

3. Kumar E.K., Tamura Y., Yoshida A., Kim Y.C., Yang Q. *Jnl. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 122 (2013), pp. 60-68.

4. Jencks Ch. *The New Paradigm in Architecture*, (seventh edition of *The Language of Post-Modern Architecture*), Yale University Press, London, New Haven, 2002. 228 p.

5. Schumacher P. (2009) *A New Global Style for Architecture and Urban Design*. *AD Architectural Design - Digital Cities*. Vol 79, No 4, 2009. doi: 10.1002/ad.912.



6. Dautremont C., Jancart S., C Dagnelie C., Stals A. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 225 (2019). Pp.1-8. doi:10.1088/1755-1315/225/1/012071.

7. Krivoschapko S.N., Ivanov V.N., Halabi S.M., Analiticheskie poverhnosti: materialy po geometrii 500 poverhnostej. Nauchnoe izd [Analytical surfaces: geometry of 500 surfaces]. M.: «Nauka», 2006. p. 168, 382.

8. Shekastehband, B., Abedi, K., Dianat, N.: Experimental and numerical studies on the progressive collapse behavior of tensegrity systems. Int. J. Space Struct. 29 (2014). Pp. 9–24.

9. Rudenko D.V., Rudenko V.V. Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal, Saint Petersburg, 2009, №3. P. 39. URL: engstroy.spbstu.ru/article/2009.5.8/.

10. Almazov V.O., Kkhoy Kao Zuy. Dinamika progressiruyushchego razrusheniya monolitnykh mnogoetazhnykh karkasov [The dynamics of progressive collapse of monolithic multistory carcasses]. M.: ASV, 2013. 128 p.

11. Agapov V.P. Metod konechnykh elementov v statike, dinamike i ustoychivosti konstruktsiy [Finite element method in static, dynamics and stability of constructions]. M.: Izdatel'stvo Assotsiatsii stroitel'nykh vuzov, 2004. 248 p.