

Исследование общей устойчивости каркаса здания методом конечных элементов

УДК 624.04

Кравченко Галина Михайловна

Канд. техн. наук, доцент кафедры «Техническая механика» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону); e-mail: galina.907@mail.ru

Труфанова Елена Васильевна

Канд. техн. наук, доцент кафедры «Техническая механика» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону); e-mail: el.trufanova@mail.ru

Бойко Анастасия Геннадьевна

Магистрант кафедры «Техническая механика» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону); e-mail: boykonastya@bk.ru

Адлейба Тему́р Согратович

Бакалавр ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону); e-mail: tima77-00@mail.ru

Статья получена: 06.01.2019. Рассмотрена: 12.01.2019. Одобрена: 15.01.2019. Опубликована онлайн: 26.03.2019. ©РИОР

Аннотация. В статье рассмотрен расчет общей устойчивости многоэтажного каркасно-монолитного здания методом конечных элементов. Приведены графическое отображение степени ответственности элементов за общую несущую способность конструкции и коэффициент запаса устойчивости. Результаты исследования критических сил и форм потери устойчивости каркаса здания позволяют уточнить методику определения опасных при расчете на прогрессирующее обрушение конструктивных элементов. Даны рекомендации по расчету и усилению колонн при имитационном моделировании прогрессирующего разрушения с учетом результатов исследования общей потери устойчивости каркаса здания.

Ключевые слова: метод конечных элементов, общая устойчивость, коэффициент запаса устойчивости, степень ответственности, форма потери устойчивости.

Для расчета высотных зданий на общую устойчивость методом конечных элементов рекомендуется использовать пространственную плитно-стержневую модель. В расчетную схему включают диафрагмы жесткости, колонны, пилоны, плиты перекрытия, аутригерные и технические этажи [1].

При поэтапном возведении здание отклоняется от первоначального вертикального положения под действием внешних нагрузок. Вертикальные нагрузки в отклоненном состо-

RESEARCH OF THE STABILITY ANALYSIS FOR FRAME BUILDINGS USING FINITE ELEMENT METHOD

Galina Kravchenko

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Don State Technical University, Rostov-on-Don; e-mail: galina.907@mail.ru

Elena Trufanova

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Don State Technical University, Rostov-on-Don; e-mail: el.trufanova@mail.ru

Anastasia Boyko

Master's Degree Student, Don State Technical University, Rostov-on-Don; e-mail: boykonastya@bk.ru

Temur Adleiba

Bachelor's Degree Student, Don State Technical University;

e-mail: tima77-00@mail.ru

Manuscript received: 06.01.2019. **Revised:** 12.01.2019. **Accepted:** 15.01.2019. **Published online:** 26.03.2019. ©РИОР

Abstract. In this article, general stability analysis is considered, in order to obtain the load-bearing capacity of the multi-storey building using finite element method. There are some graphical interpretations for FE results that illustrate safety factor for each structural member of the structure and different mode shapes with their corresponding frequencies. These results can be used to improve the structural member design method in case of progressive collapse possibility. The article provides recommendations for strengthening and design of structural member.

Keywords: finite element method, structural stability, safety factor, buckling mode shape.

янии создают дополнительные усилия, увеличивая деформации. При недостаточной жесткости и большой массе здания увеличение деформаций может быть значительным и вызывать потерю общей устойчивости здания. Для обеспечения надежности принятых конструктивных решений необходимо на стадии проектирования выполнить расчет каркаса здания на устойчивость.

Объектом исследования является монолитный железобетонный каркас многоэтажного здания. Расчетная модель каркаса здания разработана в ПК «ЛИРА-САПР». Для моделирования плитного ростверка, плит перекрытия и покрытия, стен и диафрагмы жесткости использованы универсальные треугольные и четырехугольные оболочечные элементы с шестью степенями свободы в узле. Колонны в расчетной модели учтены универсальными пространственными стержнями с шестью степенями свободы в узле (рис. 1).

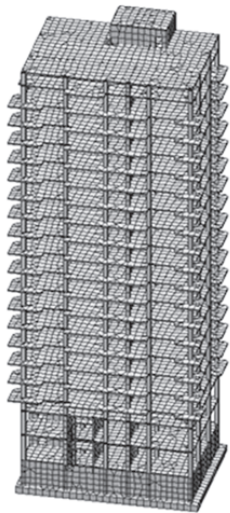


Рис. 1. Конечно-элементная модель каркаса здания

В расчетной модели учтены статические нагрузки: собственный вес конструкций здания, снеговая нагрузка на покрытие, полезная нагрузка, ветровая нагрузка [2]. Фундаментная плита жестко закреплена в опорных узлах [3].

По результатам динамического расчета первая и вторая формы собственных колебаний — поступательные, третья — крутильная (рис. 2). Такая последовательность форм колебаний подтверждает правильность принятых конструктивных решений каркаса здания [4; 5].

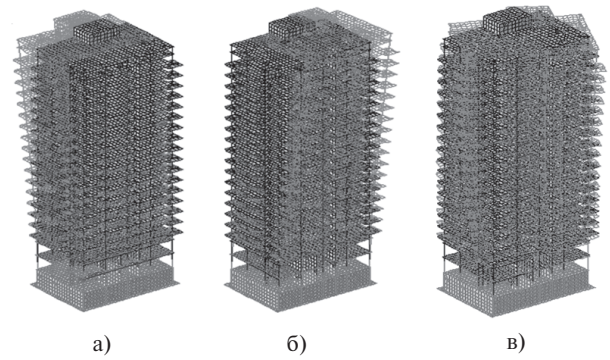


Рис. 2. Формы колебаний: а) первая форма; б) вторая форма; в) третья форма

По результатам модального анализа определена пульсационная составляющая ветровой нагрузки. Выполнен общий статический расчет каркаса здания с учетом пульсационной составляющей ветровой нагрузки, получены перемещения узлов конечно-элементной модели (рис. 3).

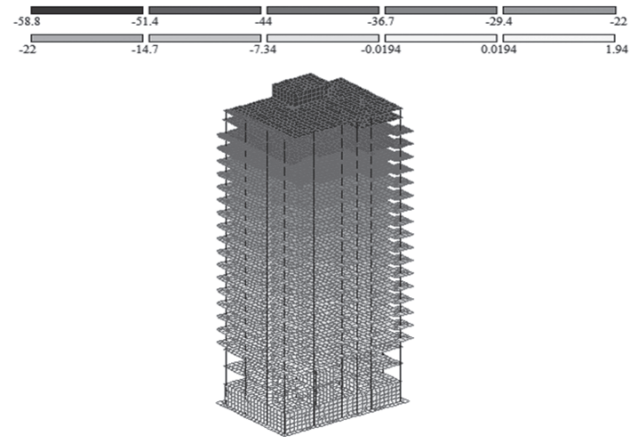


Рис. 3. Горизонтальные перемещения каркаса здания

Максимальное горизонтальное перемещение в поперечном направлении составляет 58,8 мм, в продольном направлении — 9,46 мм, что меньше нормативного значения $h/500 = 67750/500 = 135,5$ мм.

ПК «ЛИРА-САПР» позволяет исследовать общую устойчивость конечно-элементной модели с определением коэффициента запаса и формы потери устойчивости. Расчетные сочетания вертикальных нагрузок учтены при выполнении расчета на устойчивость в упругой постановке с учетом изгибно-крутильных форм

[6]. Результаты расчета на устойчивость содержат формы потери устойчивости и коэффициенты запаса устойчивости.

Для монолитных железобетонных зданий коэффициент запаса устойчивости должен превышать 2. Полученный в результате расчета коэффициент 10,8299 соответствует нормам и подтверждает правильность конструктивных решений каркаса здания.

Степень ответственности — безразмерная величина, принимающая значения от 0 до 1 включительно, вычисляется на основании энергии 1-й формы потери устойчивости. Степень ответственности 1 соответствует наиболее ответственному элементу схемы [7].

На рис. 4. приведено графическое отображение степени ответственности элементов схемы за общую несущую способность конструкции, как всего каркаса, так и элементов первого и второго этажей. Коричневым цветом отмечены колонны каркаса с наибольшей степенью ответственности.

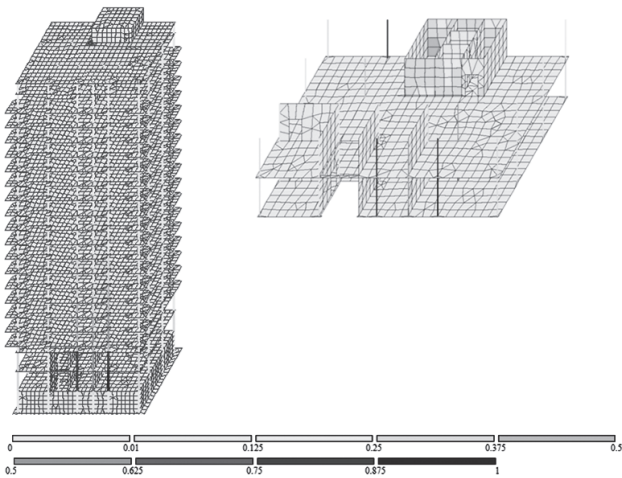


Рис. 4. Степень ответственности элементов:

а) каркаса здания; б) элементов первого и второго этажей

На рис. 5 показаны усилия в колоннах каркаса здания из линейного расчета. Наиболее нагруженные колонны выделены синим цветом. Анализ результатов по определению критических сил и соответствующих им форм потери устойчивости показал несоответствие реализованного варианта статического расчета с учетом пульсационной составляющей ветровой нагрузки и результата по определению степени ответственности элементов каркаса здания.

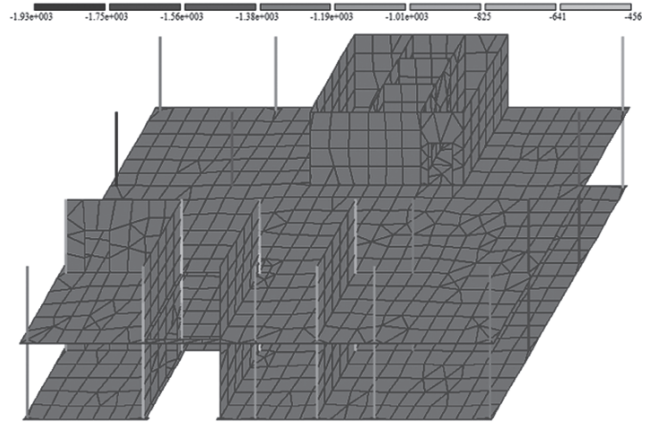


Рис. 5. Усилия в колоннах каркаса здания

Анализ чувствительности элементов расчетной модели к общей потере устойчивости позволяет дать рекомендации, на какие элементы следует обратить внимание при исследовании устойчивости каркаса здания к прогрессирующему обрушению.

Имитационное моделирование прогрессирующего обрушения высотного здания методом конечных элементов позволяет исследовать аварийную ситуацию по аналогии с особым воздействием на каркас здания.

Аварийная ситуация представляет собой внезапное разрушение колонны крайнего ряда первого этажа в монолитно-каркасном здании.

Применение имитационного моделирования при расчете высотного здания на прогрессирующее разрушение методом конечных элементов предполагает удаление из расчетной схемы наиболее нагруженной колонны с целью исследования поведения каркаса в аварийной ситуации. Таких сценариев разрушения может быть несколько. Для пространственного каркаса нет четких рекомендаций, удаление каких именно элементов наиболее опасно по критерию устойчивости элементов здания при прогрессирующем обрушении. Удаление колонн первого этажа по различным сценариям аварийной ситуации и анализ результатов имитационного моделирования прогрессирующего обрушения значительно увеличивают объем вычислений. В зданиях без жесткого блока при разрушении колонны нагрузки перераспределяются на ближайшие колонны пропорционально их новым грузовым площадям. Результаты исследования критических сил и форм

потери устойчивости каркаса здания позволяют уточнить методику определения опасных при расчете на прогрессирующее обрушение конструктивных элементов. Необходимо вы-

полнять расчет и усиление колонн не только соседних с разрушенной, а с учетом результатов исследования общей потери устойчивости каркаса здания.

Литература

1. Белостоцкий А.М. Расчетные исследования напряженно-деформированного состояния, прочности и устойчивости несущих конструкций высотного здания с учетом фактического положения железобетонных конструкций [Текст] / А.М. Белостоцкий [и др.] // Вестник МГСУ. — 2015. — № 4. — С. 50–68.
2. Агаханов Э.К. Расчет зданий сложной геометрической формы на ветровые воздействия [Текст] / Э.К. Агаханов [и др.] // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. — 2017. — Т. 44. — № 2. — С. 8–17.
3. Кравченко Г.М. Динамический расчет объекта «Спортивно-оздоровительный комплекс» технопарка РГСУ [Текст] / Г.М. Кравченко [и др.] // Инженерный вестник Дона. — 2015. — № 4.
4. Кравченко Г.М. Динамический расчёт и анализ полусферической оболочки покрытия объекта «Зимний сад» технопарка Ростовского государственного строительного университета (РГСУ) [Текст] / Г.М. Кравченко [и др.] // Инженерный вестник Дона. — 2016. — № 1.
5. Агаханов Э.К. Регулирование параметров собственных колебаний пространственного каркаса здания [Текст] / Э.К. Агаханов, Г.М. Кравченко, Е.В. Труфанова // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. — 2016. — Т. 42. — № 3. — С. 8–15.
6. Кравченко Г.М. Общая устойчивость сферической оболочки покрытия объекта «Зимний сад» технопарка РГСУ [Текст] / Г.М. Кравченко, Е.В. Труфанова, Т.Р. Кубашов // Инженерный вестник Дона. — 2015. — № 3. — С. 111.
7. Городецкий Д.А. Программный комплекс ЛИРА-САПР [Текст]: учеб. пособие / Д.А. Городецкий [и др.]. — Киев—М., 2013. — 375 с.

References

1. Belostotskiy A.M., Akimov P.A., Petryashev N.O., Petryashev S.O., Negrozov O.A. Raschetnye issledovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya, prochnosti i ustoychivosti nesushchikh konstruktсий vyshotnogo zdaniya s uchetom fakticheskogo polozheniya zhelezobetonnykh konstruktсий [Computational studies of the stress-strain state, strength and stability of the supporting structures of a high-rise building, taking into account the actual position of reinforced concrete structures]. *Vestnik MGSU* [Bulletin of MGSU]. 2015, I. 4, pp. 50–68.
2. Agakhanov E.K., Kravchenko G.M., Osadchiy A.S., Trufanova E.V. Raschet zdaniy slozhnoy geometricheskoy formy na vetrovye vozdeystviya [Calculation of buildings of complex geometric shape for wind effects]. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskije nauki* [Bulletin of the Dagestan State Technical University. Technical science]. 2017, V. 44, I. 2, pp. 8–17.
3. Kravchenko G.M., Trufanova E.V., Shutenko E.O., Khashkhozhev K.N. Dinamicheskiy raschet ob"ekta «Sportivno-ozdorovitel'nyy kompleks» Tekhnoparka RGSU [Dynamic calculation of the object "Sports complex" Technopark RGSU]. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don]. 2015, I. 4.
4. Kravchenko G.M., Trufanova E.V., Borisov S.V., Kostenko S.S. Dinamicheskiy raschet i analiz polusfericheskoy obolochki pokrytiya ob"ekta «Zimniy sad» Tekhnoparka Rostovskogo gosudarstvennogo stroitel'nogo universiteta (RGSU) [Dynamic calculation and analysis of the hemispherical shell of the Winter Garden object at the Technopark of the Rostov State Construction University (RGSU)]. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Don Engineering Bulletin]. 2016, I. 1.
5. Agakhanov E.K., Kravchenko G.M., Trufanova E.V. Regulirovanie parametrov sobstvennykh kolebaniy prostanstvennogo karkasa zdaniya [Regulation of parameters of natural oscillations of the spatial frame of the building]. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskije nauki* [Bulletin of the Dagestan State Technical University. Technical science]. 2016, V. 42, I. 3, pp. 8–15.
6. Kravchenko G.M., Trufanova E.V., Kubashov T.R. Obshchaya ustoychivost' sfericheskoy obolochki pokrytiya ob"ekta «Zimniy sad» Tekhnoparka RGSU [The overall stability of the spherical shell covering the object "Winter Garden" Technopark RGSU]. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don]. 2015, I. 3, p. 111.
7. Gorodetskiy D.A., Barabash M.S., Vodop'yanov R.Yu., Titok V.P., Artamonova A.E. *Programmnyy kompleks LIRA-SAPR 2013* [Program complex LIRA-SAPR 2013]. Kiev—Moscow, 2013. 375 p.