

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ. СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА. ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.04

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.11.1746-1757

Информационное моделирование динамических воздействий на уникальное здание многофункционального комплекса параметрической архитектуры

Элифхан Керимханович Агаханов¹, Мурад Кирымханович Агаханов²,
Елена Васильевна Труфанова³

¹ Дагестанский государственный технический университет (ДГТУ); г. Махачкала, Россия;

² Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия;

³ Донской государственный технический университет (ДГТУ); г. Ростов-на-Дону, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Исследовано формообразование гофрированной поверхности с последующим выбором формы для создания объемно-планировочных решений каркаса здания. Формообразование поверхности осуществлено в программном комплексе (ПК) САПФИР. Проведено совмещение гофрированной поверхности и циклической поверхности для создания архитектурного облика уникального здания многофункционального комплекса. Выполнены расчет методом конечных элементов аналитической модели каркаса уникального многофункционального комплекса параметрической архитектуры и подбор оптимальных конструктивных решений. Дополнительно изучено влияние добавления аутригерных этажей в конечно-элементную модель на разных уровнях каркаса здания.

Материалы и методы. Формообразование гофрированной поверхности выполнено в ПК САПФИР. Конечно-элементная модель получена путем экспорта аналитической модели в ПК Лири-САПР. Для подтверждения правильности принятых конструктивных решений по каркасу здания исследованы напряженно-деформированное состояние конструкций, частота и формы собственных колебаний. Предложено четыре варианта расположения аутригерных систем, рассмотрено влияние аутригерных этажей на динамический отклик каркаса здания.

Результаты. В результате расчетов получены значения горизонтальных перемещений каркаса здания, не превышающие нормативные значения. Изменение конструктивных решений позволило сделать первую и вторую форму колебаний поступательной, третью — крутильной. Характер динамического отклика показывает экономичность принятых конструктивных решений каркаса уникального здания. Численный эксперимент позволил добиться снижения горизонтальных перемещений на 25 %, что увеличивает общую устойчивость и пространственную жесткость каркаса здания.

Выводы. Получена форма уникального здания параметрической архитектуры. Проведено исследование влияния аутригерных систем на динамические характеристики каркаса здания. По результатам исследований разработан каркас уникального здания многофункционального комплекса, отвечающего требованиям надежности и экономичности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: информационное моделирование, параметрическая архитектура, уникальное здание, метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние, аутригерная система, динамический отклик

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Агаханов Э.К., Агаханов М.К., Труфанова Е.В. Информационное моделирование динамических воздействий на уникальное здание многофункционального комплекса параметрической архитектуры // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 11. С. 1746–1757. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.11.1746-1757

Автор, ответственный за переписку: Мурад Кирымханович Агаханов, muradak@mail.ru.

Information modelling of dynamic impacts on a unique building of a multifunctional complex of parametric architecture

Elifhan K. Agahanov¹, Murad K. Agahanov², Elena V. Trufanova³

¹ Dagestan State Technical University (DSTU); Makhachkala, Russian Federation;

² Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation;

³ Don State Technical University (DSTU); Rostov-on-Don, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The study of corrugated surface shaping with subsequent shape selection for creating volumetric planning solutions for the building frame was performed. Surface shaping was performed in the SAPFIR software package. The corrugated surface and cyclic surface were combined to create the architectural appearance of a unique building of a multifunctional complex. The calculation of the analytical model of the frame of a unique multifunctional complex of parametric architecture was performed using the finite element method and the selection of optimal design solutions was performed. Additionally, the effect of adding outrigger floors to the finite element model at different levels of the building frame was studied.

Materials and methods. The corrugated surface was formed in the SAPFIR software package. The finite element model was obtained by exporting the analytical model to the Lira-SAP. software package. To confirm the correctness of the adopted design solutions for the building frame, a study was conducted on the stress-strain state of the structures, the frequency and shape of natural vibrations. Four options for the location of outrigger systems were proposed, and the influence of outrigger floors on the dynamic response of the building frame was studied.

Results. As a result of the calculations, the values of horizontal displacements of the building frame were obtained, which do not exceed the standard values. The change in design solutions allowed to make the first and second forms of oscillations translational, the third — torsional. The obtained nature of the dynamic response shows the efficiency of the adopted design solutions of the unique building frame. The numerical experiment allowed to achieve a reduction in horizontal displacements by 25 %, which increases the overall stability and spatial rigidity of the building frame.

Conclusions. As a result of the study, a form of a unique building of parametric architecture was obtained. A study of the influence of outrigger systems on the dynamic characteristics of the building frame was carried out. Based on the research results, the frame of a unique building of a multifunctional complex meeting the requirements of reliability and cost-effectiveness is developed.

KEYWORDS: information modelling, parametric architecture, unique building, finite element method, stress-strain state, outrigger system, dynamic response

FOR CITATION: Agahanov E.K., Agahanov M.K., Trufanova E.V. Information modeling of dynamic impacts on a unique building of a multifunctional complex of parametric architecture. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(11):1746-1757. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.11.1746-1757 (rus.).

Corresponding author: Murad K. Agahanov, muradak@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Современные методы автоматизированного проектирования применяются на всех этапах разработки строительного объекта. Большое внимание уделяется поиску оптимальной формы будущего здания, которая является отражением прогресса в сфере технологий, строительных материалов и методов производства работ. Важную роль занимает новый архитектурный стиль — параметризм, воплощающий многообразие криволинейных форм внешних оболочек зданий, возможный благодаря развитию программных комплексов (ПК) и вдохновляющий на создание архитектуры будущего [1, 2].

В процессе параметрического моделирования внешний вид здания формируется на базе аналитических поверхностей, доступных к редактированию путем изменения математических уравнений и параметров. Алгоритм такого проектирования включает три этапа: создание уникальной формы, конструирование и расчет несущих элементов каркаса, разработка чертежей [3].

Поиск формы основан на применении ПК, позволяющих вводить зависимости между геометрическими характеристиками проектируемых объектов. Преимущество данного метода состоит в возможности конвертации проекта из одной программы в другую для более удобного редактирования и проектирования объекта в целом. Форма здания, как правило, имеет сложную геометрию и может принимать разные очертания, ограниченные лишь целесообразностью и оптимальностью

решений, а также учитывающие назначение будущего объекта строительства [4–6].

Цифровые модели здания позволяют оперативно проанализировать различные конструктивные решения, выявить их достоинства и недостатки.

Проектирование уникальных зданий напрямую связано с решением ряда задач, в том числе выходящих за рамки соответствующих нормативных документов. В связи со сравнительно небольшим объемом строительных проектов подобного уровня появляется необходимость тщательного контроля, чтобы в разрабатываемых расчетных конечно-элементных моделях уникальных высотных и большепролетных сооружений были учтены все особенности принимаемых расчетных схем, сочетаний нагрузок, а также физико-механических характеристик применяемых материалов с учетом сроков службы зданий. Уникальные объекты, как правило, характеризуются повышенными строительными объемами и сложными расчетными схемами, поэтому выявление на ранней стадии каких-либо опасных изменений в напряженно-деформированном состоянии (НДС) несущих элементов в процессе строительства и эксплуатации — важная задача.

Прогрессивные методы моделирования и разработки проектов, обусловленные гармоничным восприятием формы, актуальны в настоящее время. Привлечение к процессу проектирования вычислительных ПК и систем автоматизированного проектирования может еще на стадии концептуального моделирования обеспечить правильность объемно-планировочного решения объекта. Проявление нели-

нейности в архитектуре определено по большей части особой техникой моделирования пространственной формы. Применение особенностей эволюции формообразования дает возможность использования BIM-технологий при проектировании уникальных зданий и сооружений. Параметрический метод формообразования адаптивен к необходимым изменениям на всех фазах проектирования, а также способствует нетрудоёмкой коррекции внешнего вида концепта.

При разработке конструктивных решений и проектировании высотного здания особое внимание уделяется такому основному фактору, как воздействие ветра. Ветровое давление, увеличивающееся с высотой от поверхности земли, способно негативно воздействовать на здание, вызывать колебания и значительные деформации несущих элементов каркаса. Поэтому важно учитывать аэродинамические характеристики формы сооружения, от которых зависит устойчивость на протяжении полного срока эксплуатации.

Варьированием соотношения жесткостей элементов несущего каркаса возможно решение такой задачи, как регулирование перемещений и усилий в элементах строительных конструкций, а также изменение главных форм колебаний.

Общий принцип анализа собственных колебаний пространственного каркаса состоит в стремлении найти такое расположение несущих элементов и соотношение их жесткостей, при котором отклонения здания от вертикали стремились к минимуму. Кроме того, рационально запроектированная схема здания позволит минимизировать эффект закручивания в первых двух формах собственных колебаний.

Так как на уникальные высотные здания влияют большие горизонтальные нагрузки от воздействия ветра, приводящие к раскачиванию каркаса, необходимо предусмотреть мероприятия, обеспечивающие возведение несущих конструкций в строго проектном положении.

Цель исследования состоит в применении гофрированной поверхности при разработке проекта уникального многофункционального комплекса, подборе оптимальной конструктивной схемы и анализе НДС несущего каркаса здания.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В современной архитектуре для придания индивидуальности зданию применяются нестандартные методы, требующие использования программного обеспечения с целью формирования взаимосвязей между различными элементами проекта, а также геометрическими и физическими параметрами объектов.

Основой будущего внешнего облика многофункционального комплекса является поверхность в виде гофрированной сферы. Параметрическую форму задания гофрированной поверхности поддерживает ПК САПФИР 2016. В основании рассматриваемой

поверхности лежит круговая синусоида, заданная в виде:

$$\begin{aligned} X = f(u) &= (R + a \cdot \cos(n \cdot u)) \cdot \cos(u); \\ Y = f(u) &= (R + a \cdot \cos(n \cdot u)) \cdot \sin(u); \\ Z &= 0, \end{aligned}$$

где R — радиус окружности сферы на экваторе, относительно которой построена круговая синусоида; a — максимальная амплитуда гофров в основании поверхности (на экваторе); n — число вершин синусоиды на круговом плане; u — угол, отсчитываемый от оси Ox в сторону оси Oy .

Создание 3D-модели гофрированной сферы осуществляется путем ввода уравнений, которые определяют координаты всех точек, принадлежащих данной поверхности, в пространстве:

$$\begin{aligned} X = f(u, v) &= (R \cdot \cos(v) + \\ &+ a \cdot (1 - \sin(v))\cos(n \cdot u)) \cdot \cos(u); \\ Y = f(u, v) &= (R \cdot \cos(v) + \\ &+ a \cdot (1 - \sin(v))\cos(n \cdot u)) \cdot \sin(u); \\ Z = f(u, v) &= R \cdot \sin(v), \end{aligned}$$

где v — угол, отсчитываемый от плоскости xOy в сторону оси Oz ; $0 < v < \pi/2$, $0 < u < 2\pi$.

Исходная форма гофрированной поверхности получается путем задания стандартных значений параметров для каждого уравнения в ПК САПФИР (рис. 1). Приняты следующие параметры: $R = 5$, $a = 1$, $n = 5$.

Изменение поверхности производится заданием переменных функций u и v , их пределов, а также параметров будущего здания R , h , a , n (рис. 2).

Для возможного удобного редактирования высоты поверхности вносятся следующие улучшающие правки в исходные параметрические уравнения (рис. 3):

1) добавляется параметр h , отвечающий за высоту будущего здания;

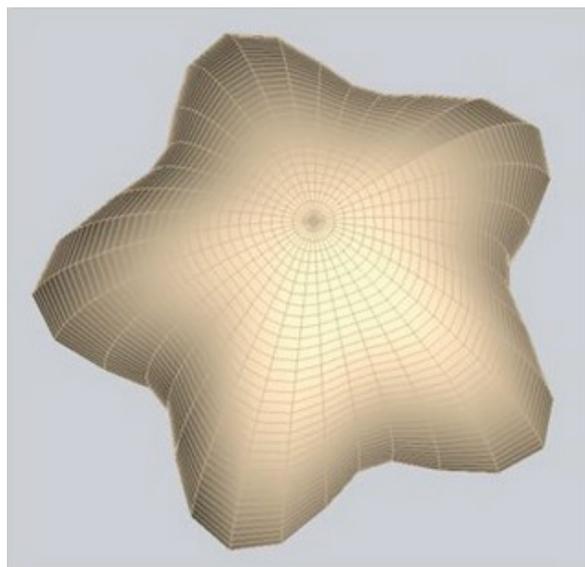


Рис. 1. Исходная форма гофрированной сферы

Fig. 1. Initial shape of the corrugated sphere

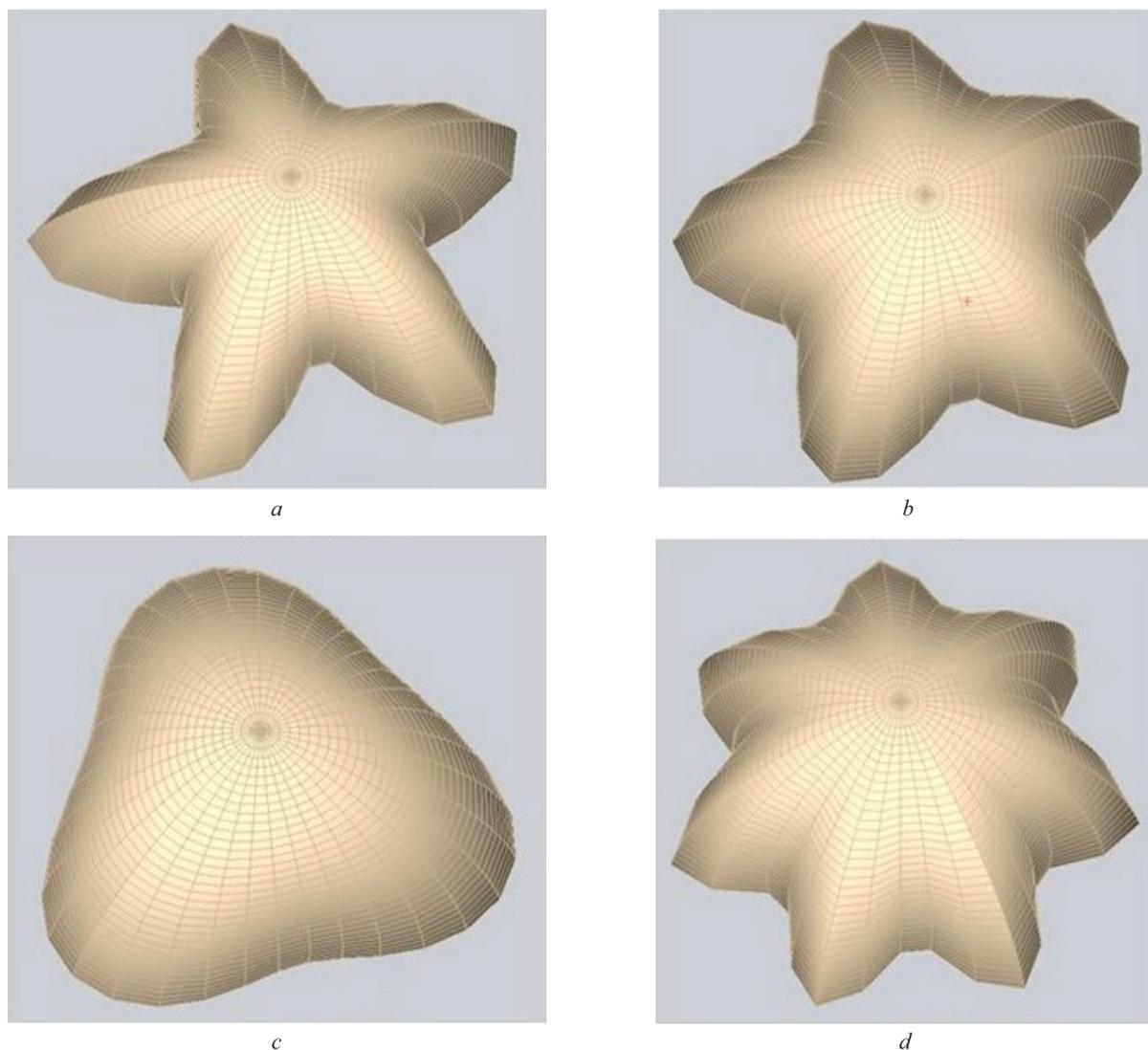


Рис. 2. Эволюция формообразования поверхности: *a* — изменение параметра a , $R = 5$, $a = 2$, $n = 5$; *b* — изменение параметров R и a , $R = 8$, $a = 2$, $n = 5$; *c* — уменьшение параметра n , $R = 5$, $a = 1$, $n = 3$; *d* — увеличение параметра n , $R = 5$, $a = 1$, $n = 7$

Fig. 2. Evolution of surface formation: *a* — change in parameter a , $R = 5$, $a = 2$, $n = 5$; *b* — change in parameters R and a , $R = 8$, $a = 2$, $n = 5$; *c* — decrease in parameter n , $R = 5$, $a = 1$, $n = 3$; *d* — increase in parameter n , $R = 5$, $a = 1$, $n = 7$

2) изменяется уравнение $Z: Z = f(u, v) = h \cdot \sin(v)$;

3) для v задается возможность изменяться в пределах $-\pi/2 < v < \pi/2$.

Исследуемый высотный многофункциональный комплекс является уникальным зданием, следовательно, высота итоговой поверхности должна превышать 100 м. Так как поверхность сужается в обоих направлениях от экваториального положения, то расположение самой широкой части формы, обусловленное соотношением высот от основания здания до экватора и от экватора до крайней верхней точки по оси Z , принимается по золотому сечению. Правило золотого сечения — это определенное правило пропорции, которое заключается в таком делении отрезка на части, чтобы отношение составных частей этого отрезка, а также отношение всего отрезка к наибольшей части составляло значение, близкое к числу 1,618.

Значения параметров для задания итоговой формы: $R = 17$, $a = 1,15$, $n = 7$, $h = 78$. Секущей плоскостью поверхность подрезается на необходимую высоту, принятую равной 126 м. Получаем итоговый вид самой высокой части комплекса, изображенный на рис. 4.

В основе концептуального образа уникального многофункционального комплекса лежат две зеркально стоящие высотные башни, образованные гофрированной поверхностью и соединенные в основании общим стилобатом, который представляет собой эллиптический цилиндр с совмещенной завершающей верхней частью в виде циклической поверхности вращения, форма и параметрические характеристики которой представлены на рис. 5.

Заключительный вариант внешнего облика уникального комплекса получен в результате сочетания четырех поверхностей с такими геометрическими

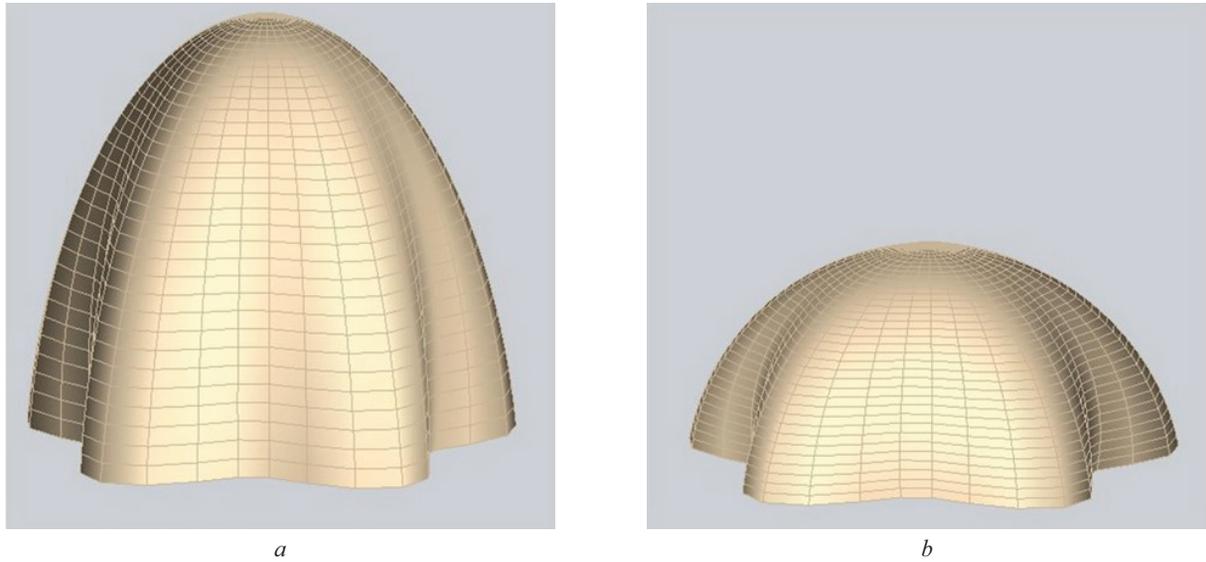


Рис. 3. Влияние параметра h на исходную форму поверхности: a — учтен параметр h , $h = 10$, $R = 5$, $a = 1$, $n = 5$; b — параметр h не учитывался, $R = 5$, $a = 1$, $n = 5$

Fig. 3. Influence of parameter h on the initial shape of the surface: a — parameter h is taken into account, $h = 10$, $R = 5$, $a = 1$, $n = 5$; b — parameter h was not taken into account, $R = 5$, $a = 1$, $n = 5$

параметрами, которые бы не противоречили расчетным, конструктивным и эстетическим требованиям при дальнейшей разработке проекта (рис. 6).

При разработке конструктивных решений поверхность разделяется по вертикали на эксплуатируемые и технические этажи, выбирается наиболее

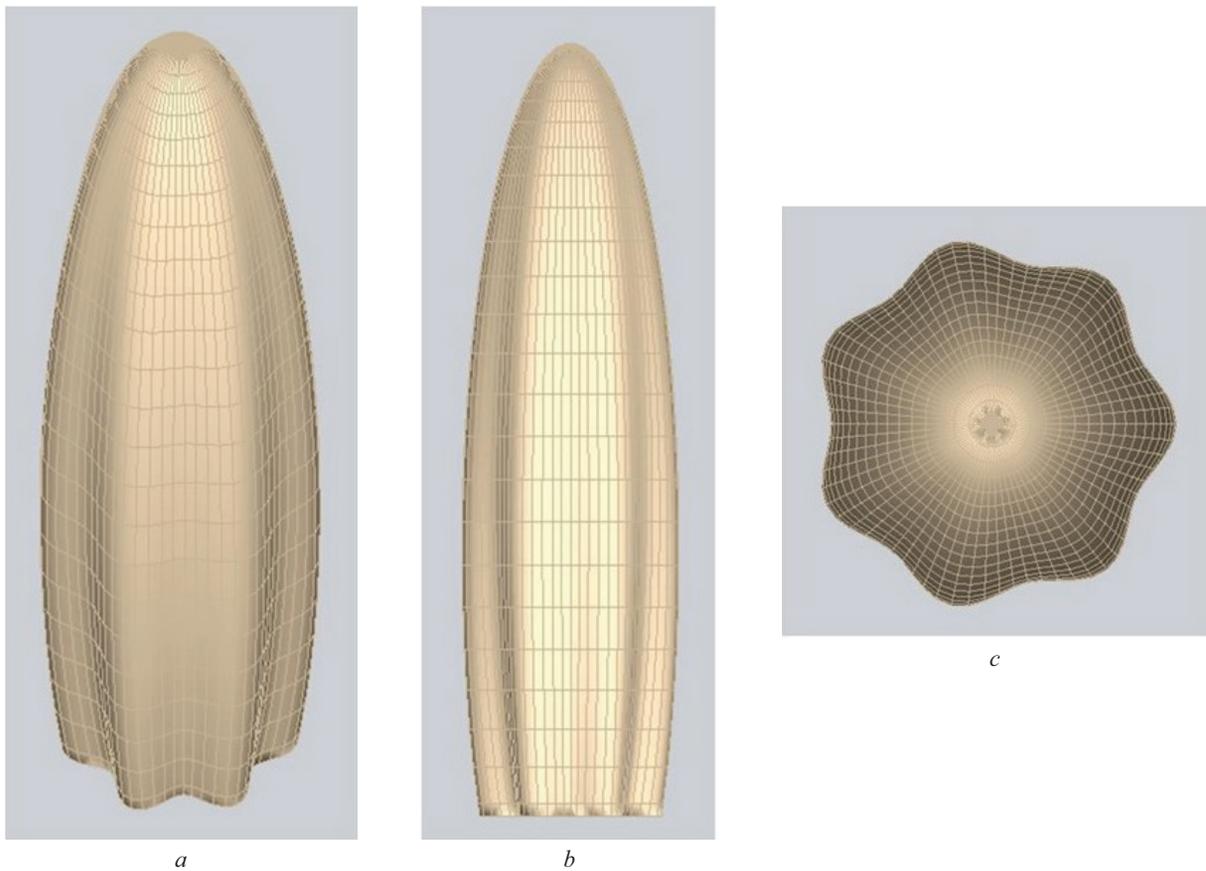


Рис. 4. Итоговая форма высотной части здания: a — изометрия; b — вид сбоку; c — вид сверху

Fig. 4. The final form of the high-rise part of the building: a — isometric; b — side view; c — top view

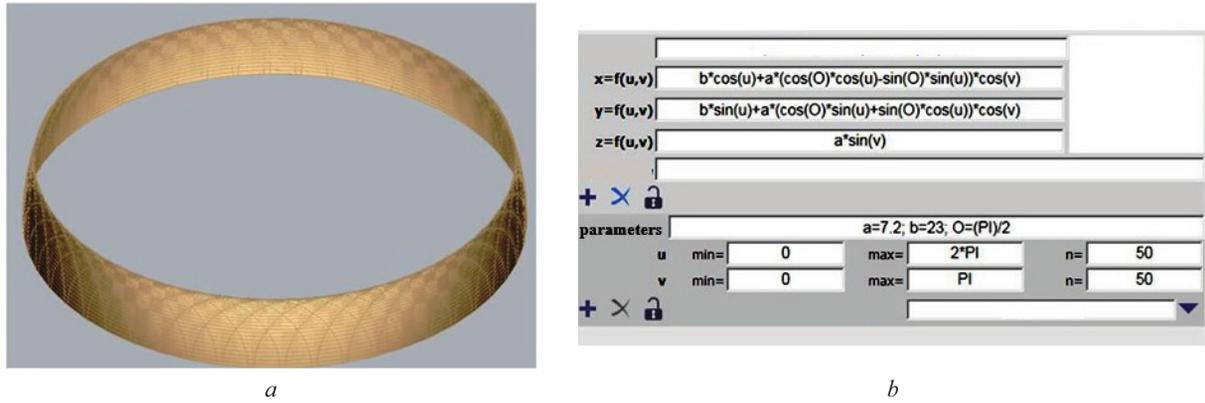


Рис. 5. Параметрическая форма задания циклической поверхности: *a* — поверхность; *b* — параметрические характеристики

Fig. 5. Parametric form of defining a cyclic surface: *a* — surface; *b* — parametric characteristics

рациональная конструктивная система и прорабатывается несущий каркас, который при расчете на статические и динамические нагрузки обязан соответствовать необходимым требованиям по устойчивости и несущей способности [7–9]. Лестнично-лифтовой узел формирует ядро жесткости, в плитах перекры-

тия предусматриваются отверстия для лифтовых шахт и лестниц, в стенах создаются проемы для выхода на кровлю и в машинное отделение грузовых и пассажирских лифтов. Конструкция переходной галереи выполнена в виде пространственной фермы из металлического профиля различного сечения.

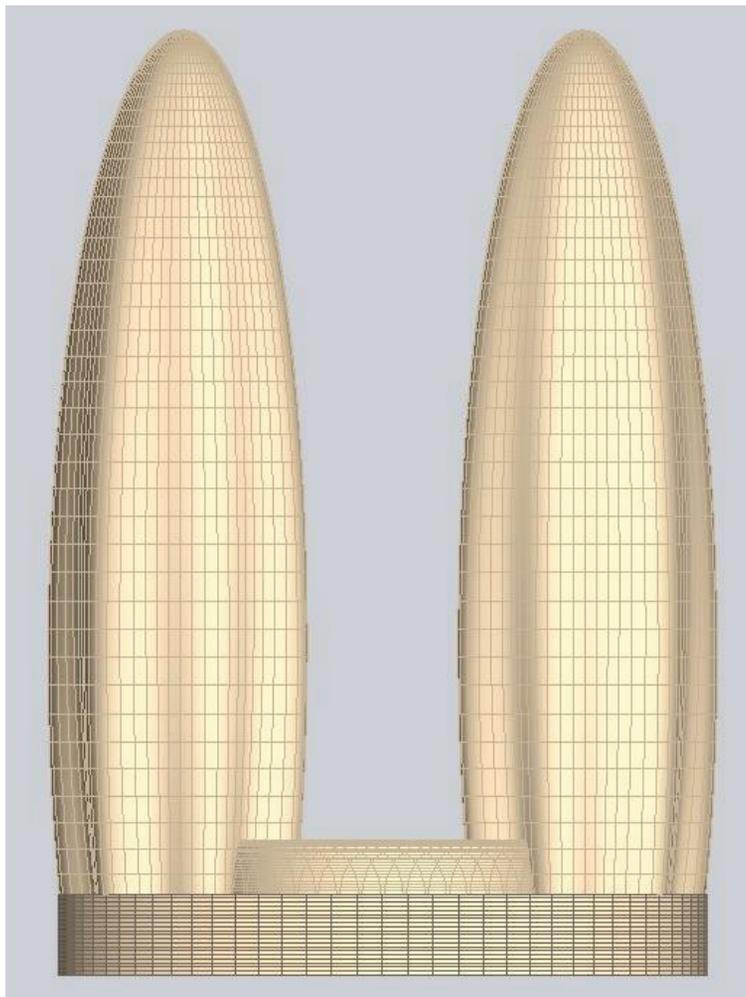


Рис. 6. Результат совмещения поверхностей

Fig. 6. Result of combining surfaces



Рис. 7. Итоговая модель: *a* — общий вид; *b* — вид на эксплуатируемую кровлю на отметке +18,000

Fig. 7. Final model: *a* — general view; *b* — view of the exploited roof at the +18.000 mark

В итоговом варианте была получена модель с монолитной каркасно-ствольной конструктивной системой (рис. 7, *a*).

Модель комплекса включает плитно-свайный фундамент, один подземный этаж высотой 3,3 м и 34 надземных этажа высотой по 3,6 м, из которых два этажа (19-й и 29-й) являются техническими, а первые пять этажей относятся к общему стилобату с эксплуатируемой кровлей на отметке +18,000 (рис. 7, *b*).

Расчетная конечно-элементная модель получена последующим экспортом итоговой модели в ПК

ЛИРА-САПР 2016 [10, 11]. Модель содержит 347 649 узлов, 398 842 элемента и 1 609 609 неизвестных (рис. 8). В расчетных моделях учтены статические и динамические нагрузки: собственный вес конструкций здания, постоянные нагрузки от веса пола и кровли, полезная нагрузка, длительная нагрузка от перегородок, снеговая нагрузка на покрытие, нагрузка от ветра с учетом пульсации.

При построении конечно-элементной модели использованы следующие типы конечных элементов (КЭ): универсальный пространственный стержневой КЭ, универсальные треугольный и четырехугольный пластинчатый КЭ. Шаг триангуляции пластин принят 0,5 м.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Модальный анализ здания позволяет определить частоты и периоды его собственных колебаний, а также главные формы, по которым оценивается эффективность несущего каркаса на этапе проектирования. На формы колебаний влияют жесткость здания и его масса. Для проведения такого анализа создается отдельное нагружение, в котором составляется согласованная матрица масс от всех вертикальных нагрузок, учитывающая как возможность линейного перемещения масс, так и их кручение.

Анализ результатов расчета показал, что влияние на расчет каркаса здания будут оказывать первые шесть форм колебаний с частотами 0,31; 0,32; 0,34; 0,51; 0,60; 0,66 Гц соответственно, которые удовлетворяют условию $f < 1,14$. Характер 1–4-й форм собственных колебаний — поступательный; 5–6-й форм — крутильный вокруг оси Z (рис. 9).

Такое распределение главных форм колебаний позволяет судить о том, что каркас здания обеспечен



Рис. 8. Расчетная модель

Fig. 8. Calculation model

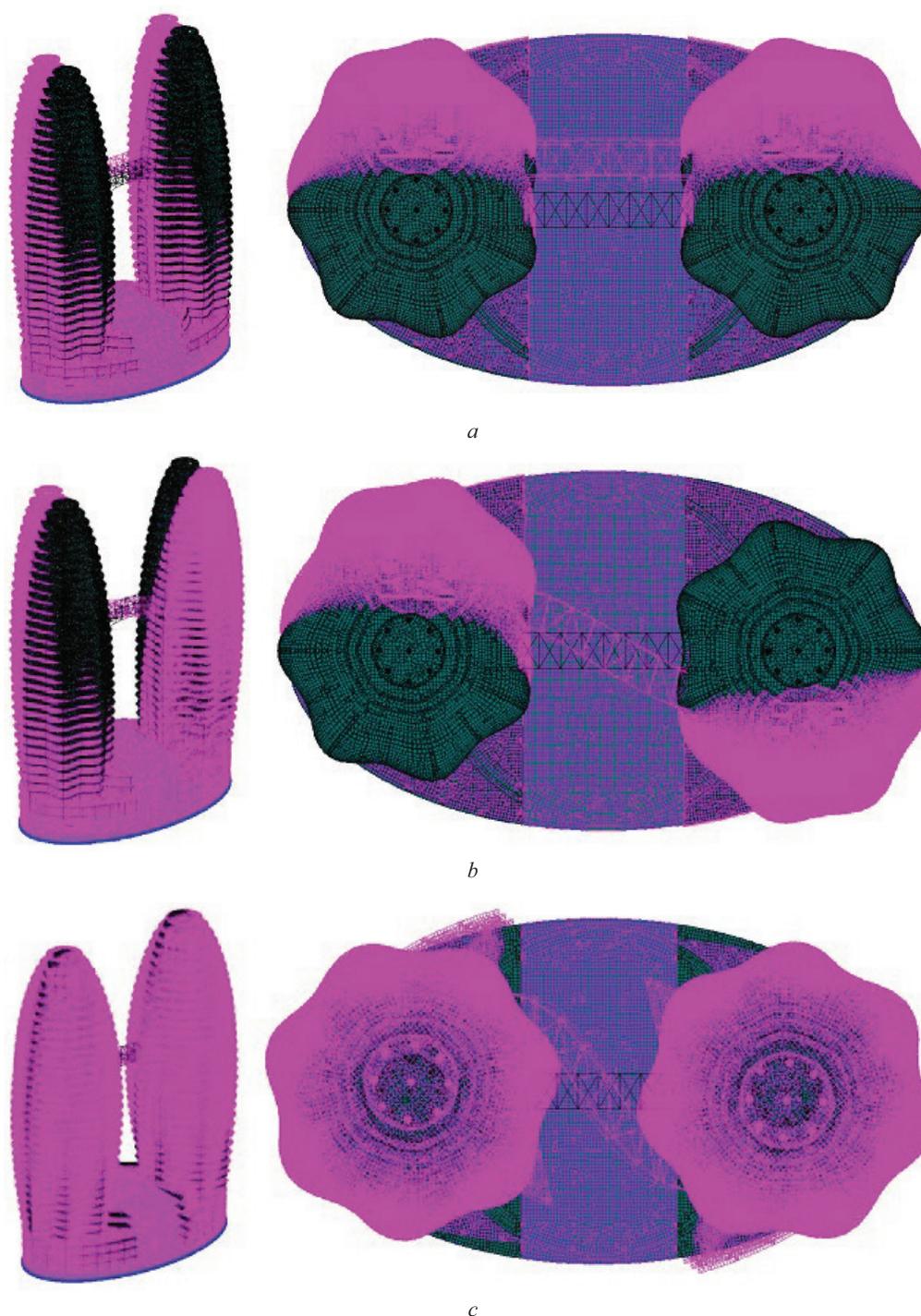


Рис. 9. Формы собственных колебаний: *a* — 1-я форма; *b* — 2-я форма; *c* — 6-я форма

Fig. 9. Forms of natural oscillations: *a* — 1 form; *b* — 2 form; *c* — 6 form

достаточной вертикальной жесткостью, введение дополнительных диафрагм не требуется.

Рассмотрены несколько вариантов моделей каркаса высотной части уникального многофункционального комплекса для проведения сравнительного анализа НДС и динамических характеристик. Расположение аутригерных этажей предусмотрено в различных уровнях [12–14]:

- модель 1 без аутригерных этажей (рис. 10, *a*);

- модель 2 с аутригерным этажом, расположенным на 19-м этаже (рис. 10, *b*);
- модель 3 с аутригерным этажом, расположенным на 29-м этаже (рис. 10, *c*);
- модель 4 с двумя аутригерными этажами, расположенными на 19-м и 29-м этажах (рис. 10, *d*).

Максимальные горизонтальные перемещения каркаса здания с вариантами расположения аутригерных этажей приведены на графике (рис. 11) [15, 16].



Рис. 10. Модели для численного эксперимента: *a* — вариант 1; *b* — вариант 2; *c* — вариант 3; *d* — вариант 4
 Fig. 10. Models for the numerical experiment: *a* — option 1; *b* — option 2; *c* — option 3; *d* — option 4

Анализ форм колебаний продемонстрировал, что первая и вторая форма колебаний всех расчетных моделей — поступательная, третья — крутильная [17, 18].

На рис. 12 представлены полученные горизонтальные деформации от сочетаний нагрузок с воздействием пульсационной составляющей ветровой нагрузки на каркас уникального комплекса с двумя аутригерными этажами в каждой высотной части [19, 20].

Анализ частот собственных колебаний показал, что во всех вариантах динамические характеристики соответствуют нормам проектирования, а горизонтальные максимальные перемещения каркаса здания не превышают предельных. На основе полученных данных сделан вывод о том, что оптимальным вариантом является решение с двумя аутригерными этажами на технических этажах, позволяющее не только увеличить общую устойчивость и пространственную

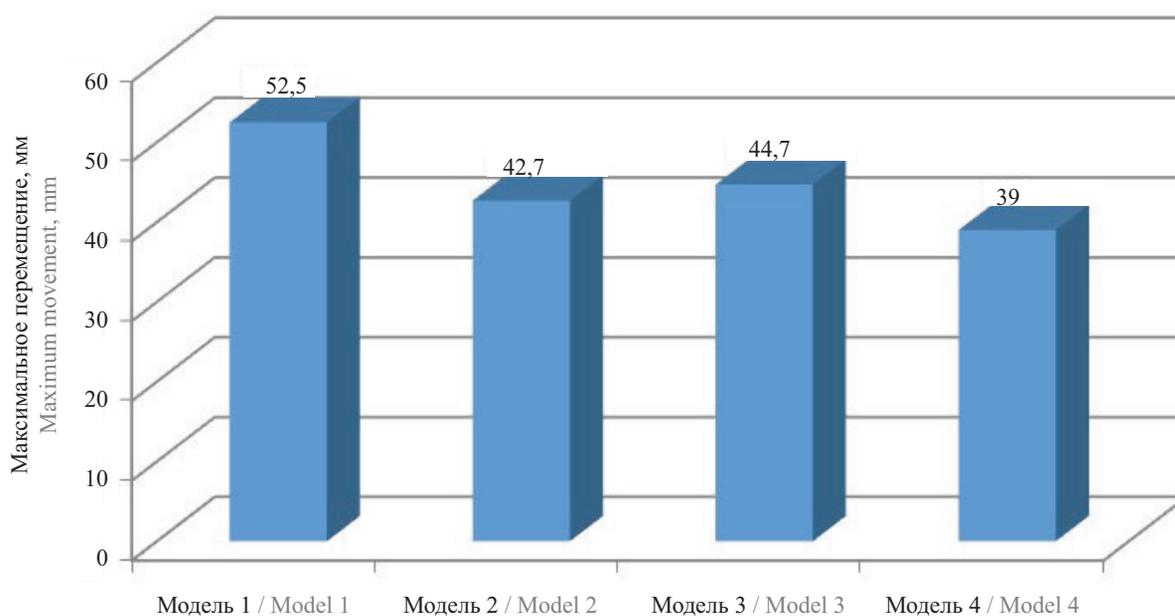


Рис. 11. График изменения горизонтальных перемещений каркаса здания

Fig. 11. Graph of changes in horizontal displacements of the building frame

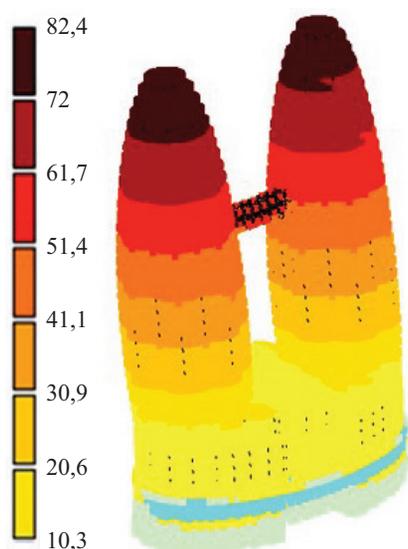


Рис. 12. Мозаика горизонтальных перемещений каркаса здания с аутригерами

Fig. 12. Mosaic of horizontal displacements of the building frame with outriggers

жесткость каркаса здания, но также уменьшить горизонтальные перемещения на 25 % по сравнению с вариантом без аутригеров.

Принятые конструктивные решения каркаса здания улучшили динамический отклик сооружения. В расчетах пульсационной составляющей учитываются только первые три формы собственных колебаний с соответствующими им значениями частот и периодов колебаний. Третья форма колебаний в исходном варианте каркаса здания была поступательной, кручение появлялось на шестой форме. Для окончательного варианта конструктивного решения крутильная форма колебаний — третья.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведен анализ эволюции формообразования гофрированной поверхности, в результате которого получена концепция проектируемого объекта. На основе полученного концепта разработаны ключевые архитектурно-планировочные и конструктивные решения 34-этажного многофункционального комплекса.

В ходе работы проанализированы несколько вариантов расположения аутригерных этажей. Включение в расчетную схему данных конструкций позволило уменьшить горизонтальные перемещения каркаса и обеспечило общую устойчивость здания. Требования норм по предельным перемещениям и частотам собственных колебаний объекта обеспечиваются.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Надыришин Н.М.* Параметризм как стиль в архитектурном дизайне // Вестник Оренбургского государственного университета. 2013. № 1 (150). С. 53–57. EDN PYNUPH.
2. *Agakhanov E.K., Kravchenko G.M., Agakhanov M.K., Trufanova E.V.* Simulation of an emergency situation of a digital architecture object // E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 410. P. 02040. DOI: 10.1051/e3sconf/202341002040
3. *Кравченко Г.М., Манойленко А.Ю., Литовка В.В.* Параметрическая архитектура // Инженерный вестник Дона. 2018. № 2 (49). С. 211. EDN MAJQHZ.
4. *Кравченко Г.М., Труфанова Е.В., Полтаев М.В., Пуданова Л.И.* Эволюция формообразования здания параметрической архитектуры с учетом аэродинамики // Инженерный вестник Дона. 2021. № 9 (81). С. 268–277. EDN QTXQKL.
5. *Шенцова О.М., Казанева Е.К.* Композиционное формообразование высотных зданий и сооружений // Евразийский союз ученых. 2017. № 11–1 (44). С. 5–12. EDN YLDKQL.
6. *Кравченко Г.М., Труфанова Е.В., Данилейко И.Ю., Забейворота В.А.* Исследование принципов формообразования объектов параметрической архитектуры // Инженерный вестник Дона. 2019. № 1 (52). С. 130. EDN USRXDK.
7. *Доствал Г., Хая В.* Применение высокопрочных бетонов в конструкциях современных высотных зданий // StudNet. 2022. Т. 5. № 6. С. 126. EDN DBAMWZ.
8. *Баранов А.О.* Конструктивные решения высотных зданий // AlfaBuild. 2018. № 3 (5). С. 33–51. EDN CYPMBH.
9. *Плетнев В.И.* О проектировании зданий повышенной этажности, стойких к прогрессирующему разрушению // Вестник гражданских инженеров. 2012. № 1 (30). С. 115–116. EDN PANVFP.
10. *Агаханов Э.К.* О развитии комплексных методов решения задач механики деформируемого твердого тела // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2013. № 2 (29). С. 39–45. EDN SCMJQR.
11. *Агаханов Э.К.* Развитие комплексных методов в механике деформируемого твердого тела // Современные строительные материалы, технологии и конструкции : мат. Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 95-летию ФГБОУ ВПО «ГНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова». 2015. С. 99–105. EDN TUBAXV.
12. *Малыгин А.Б.* Применение аутригерных этажей в высотном строительстве // Инженерный вестник Дона. 2022. № 4 (88). С. 444–452. EDN ZTJMYC.
13. *Барабаш М.* Методика моделирования прогрессирующего обрушения на примере реальных высотных зданий // Mokslas – Lietuvos Ateitis Science – Future of Lithuania. 2014. № 6 (5). С. 520–530.

14. Закиева Н.И., Гранкина Д.В., Ким К.А., Васильева Д.К. Процесс прогрессирующего обрушения высотных зданий и анализ решений, противодействующих ему // Инженерный вестник Дона. 2019. № 3 (54). С. 30. EDN PQYFFD.
15. Алмазов В.О. Проблемы прогрессирующего разрушения // Строительство и реконструкция. 2014. № 6 (56). С. 3–10. EDN TCWPWJ.
16. Алмазов В.О., Плотников А.И., Расторгуев Б.С. Проблемы сопротивления зданий прогрессирующему разрушению // Вестник МГСУ. 2011. № 2–1. С. 16–20. EDN OUVYJV.
17. Травуш В.И., Колчунов В.И., Леонтьев Е.В. Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения в рамках законодательных и нормативных требований // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 2. С. 46–54. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.02.46-54. EDN YXLQNV.
18. Домарова Е.В. Оценка устойчивости к прогрессирующему разрушению монолитных железобетонных каркасных зданий с отдельными усиленными этажами // Вестник МГСУ. 2014. № 2. С. 22–29. EDN RWMQDJ.
19. Пономарев В.Н., Травуш В.И., Бондаренко В.М., Еремин К.И. О необходимости системного подхода к научным исследованиям в области комплексной безопасности и предотвращения аварий зданий и сооружений // Архитектура. Строительство. Образование. 2014. № 2 (4). С. 7–16. EDN SABFSR.
20. Агаханов Э.К., Агаханов М.К., Труфанова Е.В. Моделирование поведения большепролетного уникального сооружения при динамическом воздействии // Системные технологии. 2023. № 4 (49). С. 17–24. DOI: 10.55287/22275398_2023_4_17. EDN RGSNAM.

Поступила в редакцию 17 сентября 2024 г.

Принята в доработанном виде 24 сентября 2024 г.

Одобрена для публикации 2 октября 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Элифхан Керимханович Агаханов** — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой транспортных сооружений и строительных материалов; **Дагестанский государственный технический университет (ДГТУ)**; 367029; г. Махачкала, пр-т Имама Шамиля, д. 70; РИНЦ ID: 254858, Scopus: 57192378702, ResearcherID: L-2840-2017, ORCID: 0000-0001-7706-8044; elifhan@bk.ru;

Мурад Кириллович Агаханов — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры сопротивления материалов; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 254857, Scopus: 57192378440, ResearcherID: AAD-5554-2022, ORCID: 0000-0001-6564-370X; muradak@mail.ru;

Елена Васильевна Труфанова — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительной механики и теории сооружений; **Донской государственный технический университет (ДГТУ)**; 344003, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1; РИНЦ ID: 651996, Scopus: 37058153900, ResearcherID: ACX-5869-2022, ORCID: 0000-0003-3998-6041; El.Trufanova@mail.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Nadyrshina N.M. Parametrizm as a style in architectural design. *Vestnik of the Orenburg State University*. 2013; 1(150):53-57. EDN PYNUPH. (rus.).
2. Agakhanov E.K., Kravchenko G.M., Agakhanov M.K., Trufanova E.V. Simulation of an emergency situation of a digital architecture object. *E3S Web of Conferences*. 2023; 410:02040. DOI: 10.1051/e3s-conf/202341002040
3. Kravchenko G., Manoilenko A., Litovka V. Parametric architecture. *Engineering journal of Don*. 2018; 2(49):211. EDN MAJQHZ. (rus.).
4. Kravchenko G.M., Trufanova E.V., Poletaev M.V., Pudanova L.I. Formation evolution of the building of parametric architecture with regard to aerodynamics. *Engineering journal of Don*. 2021; 9(81):268-277. EDN QTXQKL. (rus.).
5. Shentsova O., Kazaneva E. Compositional Formation of High-Rise Buildings and Structures. *Eurasian Union of Scientists*. 2017; 11-1(44):5-12. EDN YLDKQL. (rus.).
6. Kravchenko G.M., Trufanova E.V., Danilevko I.Yu., Zabayvorota V.A. The principles of formation of parametric architecture objects. *Engineering journal of Don*. 2019; 1(52):130. EDN USRXDK. (rus.).
7. Dostval G., Haya W. Application of high-strength concrete in the structures of modern high-rise buildings. *StudNet*. 2022; 5(6):126. EDN DBAMWZ. (rus.).
8. Baranov A.O. Constructions of high-rise buildings. *AlfaBuild*. 2018; 3(5):33-51. EDN CYPMBH. (rus.).
9. Pletnev V.I. About constructive designing of tall buildings with increased number of stories resistant to progressive destroying. *Bulletin of Civil Engineers*. 2012; 1(30):115-116. EDN PANVFP. (rus.).

10. Agakhanov E.K. About development of complex decision methods of the problems of deformable solid body mechanics. *Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences*. 2013; 2(29):39-45. EDN SCMJQR. (rus.).
11. Agakhanov E.K. Development of complex methods in mechanics of deformable solids. *Modern construction materials, technologies and structures : materials of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 95th anniversary of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education "GGNTU named after Academician M.D. Milionshchikov"*. 2015; 99-105. EDN TUBAXV. (rus.).
12. Malygin A.B. The use of outrigger floors in high-rise construction. *Engineering journal of Don*. 2022; 4(88):444-452. EDN ZTJMYC. (rus.).
13. Barabash M. Methodology for modeling progressive collapse using the example of real high-rise buildings. *Mokslas – Lietuvos Ateitis Science – Future of Lithuania*. 2014; 6(5):520-530. (rus.).
14. Zakieva N.I., Grankina D.V., Kim K.A., Vasileva D.K. The process of progressive collapse of high-rise buildings and analysis of decisions that counteract it. *Engineering journal of Don*. 2019; 3(54):30. EDN PQYFFD. (rus.).
15. Almazov V. The problems of progressive collapse. *Building and Reconstruction*. 2014; 6(56):3-10. EDN TCWPWJ. (rus.).
16. Almazov V.O., Plotnikov A.I., Rastorguev B.S. Problems of resistance of buildings to progressive collapse. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2011; 2-1:16-20. EDN OUVYJV. (rus.).
17. Travush V.I., Kolchunov V.I., Leont'yev E.V. Protection of buildings and structures against progressive collapse within the framework of legislative and regulatory requirements. *Industrial and Civil Engineering*. 2019; 2:46-54. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.02.46-54. EDN YXLQNV. (rus.).
18. Domarova E.V. Evaluation of the Resistance to Progressive Collapse of Monolithic Reinforced Concrete Frame Buildings with Separate Amplified Floors. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2014; 2:22-29. EDN RWMQDJ. (rus.).
19. Ponomarev V.N., Travush V.I., Bondarenko V.M., Eremin K.I. The necessity of systematic approach to scientific research in the field of comprehensive security and prevention of buildings and structures accidents. *Architecture. Construction. Education*. 2014; 2(4):7-16. EDN SABFSR. (rus.).
20. Agahanov E.K., Agahanov M.K., Trufanova E.V. Modeling the behavior of a long-span unique structure under dynamic impact. *System Technologies*. 2023; 4(49):17-24. DOI: 10.55287/22275398_2023_4_17. EDN RGSHAM. (rus.).

Received September 17, 2024.

Adopted in revised form on September 24, 2024.

Approved for publication on October 2, 2024.

BIONOTES: **Elifhan K. Agahanov** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Transport Structures and Construction Materials; **Dagestan State Technical University (DSTU)**; 70 Imam Shamil Avenue, Makhachkala, 367029, Russian Federation; ID RSCI: 254858, Scopus: 57192378702, ResearcherID: L-2840-2017, ORCID: 0000-0001-7706-8044; elifhan@bk.ru;

Murad K. Agahanov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Strength of Materials; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 254857, Scopus: 57192378440, ResearcherID: AAD-5554-2022, ORCID: 0000-0001-6564-370X; muradak@mail.ru;

Elena V. Trufanova — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Structural Mechanics and Theory of Structures; **Don State Technical University (DSTU)**; 1 Gagarin Square, Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation; ID RSCI: 651996, Scopus: 37058153900, ResearcherID: ACX-5869-2022, ORCID: 0000-0003-3998-6041; El.Trufanova@mail.ru.

Contribution of the authors: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The authors declare that there is no conflict of interest.