

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 624.04



DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-1-193-201 Оригинальная статья /Original article

**Моделирование каркаса уникального здания параметрической архитектуры
на основе применения поверхности «цилиндр-цилиндр»**

Э.К. Агаханов¹, М.К. Агаханов², Е.В. Труфанова³, А.З. Джабраилов¹

¹ Дагестанский государственный технический университет,
1367015, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70, Россия,

² Национальный исследовательский Московский государственный строительный
университет (НИУ МГСУ),

129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26, Россия,

³ Донской государственный технический университет,
344002, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, Россия

Резюме. Цель. В статье рассмотрено информационное моделирование каркаса уникального здания параметрической формы в программных комплексах САПФИР и Лира-САПР. **Метод.** На первом этапе рассмотрено формообразование ротативной поверхности с аксоидами «Цилиндр-цилиндр», образованной прямой, пересекающей ось подвижного цилиндра при наружном обкатывании. Варьирование параметров позволило получить ряд поверхностей, пригодных для создания параметрической формы каркаса уникального здания. Для дальнейшей работы принята поверхность с пятью выпуклыми частями. Обтекаемые формы объекта позволяют оптимизировать ветровые потоки, защищают от образования снеговых мешков, что является актуальным. **Результат.** Проведен модальный анализ для первого варианта моделирования системы. Выполнен расчет по деформациям на действие постоянных, временных длительных и кратковременных нагрузок. Проведено сравнение прогибов, горизонтальных перемещений и ускорений этажей с предельно допустимыми значениями. **Вывод.** Результаты исследования позволяют выбрать оптимальный вариант аналитической ротативной поверхности. Выполнен расчет по деформациям на действие постоянных, временных длительных и кратковременных нагрузок. Сравнение прогибов, горизонтальных перемещений и ускорений этажей с предельно допустимыми значениями показало, что они не превышают максимально допустимых значений.

Ключевые слова: параметрическая архитектура, информационное моделирование, уникальное здание, формообразование, метод конечных элементов, расчетная модель

Для цитирования: Э.К. Агаханов, М.К. Агаханов, Е.В. Труфанова, А.З. Джабраилов. Моделирование каркаса уникального здания параметрической архитектуры на основе применения поверхности «цилиндр-цилиндр». Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025; 52(1):193-201. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-1-193-201

**Modeling the frame of a unique building of parametric architecture based
on the application of the "cylinder-cylinder" surface**

E.K. Agakhanov¹, M.K. Agakhanov², E.V. Trufanova³, A.Z. Dzhabrailov¹

¹Daghestan State Technical University,

170 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367015, Russia,

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

26 Yaroslavskoe highway, Moscow 129337, Russia,

³Don State Technical University,

31 Gagarin Square, Rostov-on-Don 344000, Russia

Abstract. Objective. The article considers information modeling of the frame of a unique building of parametric form in the software packages SAPFIR and LIRA-SAPR. This type of architecture is just beginning to develop in Russia, unlike other large cities of the world, which is becoming dominant. **Method.** At the first stage, the formation of a rotary surface with axoids "Cylinder-cylinder" formed by a straight line intersecting the axis of the movable cylinder, during external rolling, was considered. Varying the parameters made it possible to obtain a number of surfaces suitable for creating a parametric form of the frame of a unique building. A surface with five convex parts is adopted. The streamlined shapes of the object allow optimizing wind flows and protect against the formation of snow bags, which is relevant. **Result.** A modal analysis was carried out for the first version of the system modeling. Calculation of deformations under the action of constant, temporary long-term and short-term loads was performed. A comparison of deflections, horizontal displacements and accelerations of floors with maximum permissible values was carried out. **Conclusion.** The results of the study allow choosing the optimal variant of the analytical rotational surface. The calculation of deformations under the action of constant, temporary long-term and short-term loads is performed. Comparison of deflections, horizontal displacements and accelerations of floors with maximum permissible values showed that they do not exceed the maximum permissible values.

Keywords: parametric architecture, information modeling, unique building, shaping, finite element method, calculation model.

For citation: E.K. Agakhanov, M.K. Agakhanov, E.V. Trufanova, A.Z. Dzhabrailov. Modeling the frame of a unique building of parametric architecture based on the application of the "cylinder-cylinder" surface. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025; 52(1):193-201. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-1-193-201.

Введение. Проектирование зданий – сложный, многогранный процесс, который содержит обширное количество этапов. Новые материалы и технологии оживляет энтузиазм к разработке проектов с уникальными формами, как с точки зрения архитектуры, так и с точки зрения проектирования. В этом вопросе множество геометрических конфигураций зданий, фасадных решений и каркасов зданий и сооружений значительно зависит от формы, выбранной поверхности. Возможность реализации сложных форм параметрической архитектуры стала более доступна благодаря применению в проектировании современных цифровых информационных технологий.

Постановка задачи. В современном строительстве при проектировании уникальных зданий становится все более актуальным применение параметрической модели различных поверхностей, поскольку возникает стремление к созданию чего-то нового [1-3].

Рассмотрим ротативная поверхность с аксоидами «Цилиндр-цилиндр», образованная прямой, пересекающей ось подвижного цилиндра при наружном обкатывании (рис. 1).

Пусть образующая прямая задана в подвижной системе координат $O_1X_1Y_1Z_1$ в виде: $X_1=u$; $Y_1=0$; $Z_1=H(a-u)(a+b)$, где a , b , H - константы. В этом случае параметрические уравнения линейчатой ротативной поверхности, образуемой прямой образующей при внешнем качении без скольжения подвижного цилиндра с радиусом r по цилиндру с радиусом R , можно представить в виде:

$$\begin{aligned}x &= x(u, \varphi) = (R + r) \cos \varphi + u \cos(n + 1) \varphi; \\y &= y(u, \varphi) = (R + r) \sin \varphi + u \sin(n + 1) \varphi; \\z &= \frac{H(a - u)}{a + b},\end{aligned}$$

где, r – параметр, определяющий радиус внешнего подвижного цилиндра; R – параметр, определяющий радиус цилиндра, вокруг которого происходит обкатывание; n – количество выпуклых частей поверхности в плоскости XY ; a – ширина раскрытия оболочки по направлению OX ; b – ширина раскрытия оболочки по направлению OY ; H – высота цилиндра, вокруг которого происходит обкатывание.

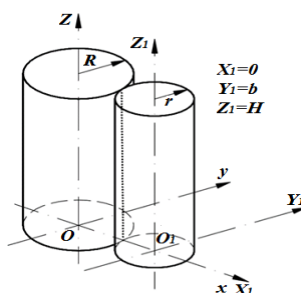


Рис. 1- Ротативная поверхность с аксоидами «Цилиндр-цилиндр»

Fig. 1 - Rotational surface with axoids "Cylinder-cylinder"

Методы исследования. Рассматриваемые линейчатые ротативные поверхности являются поверхностями отрицательной гауссовой кривизны. Для исследования эволюции формообразования используется генератор линий и поверхностей в программном комплексе САПФИР (рис. 2) [4-6].

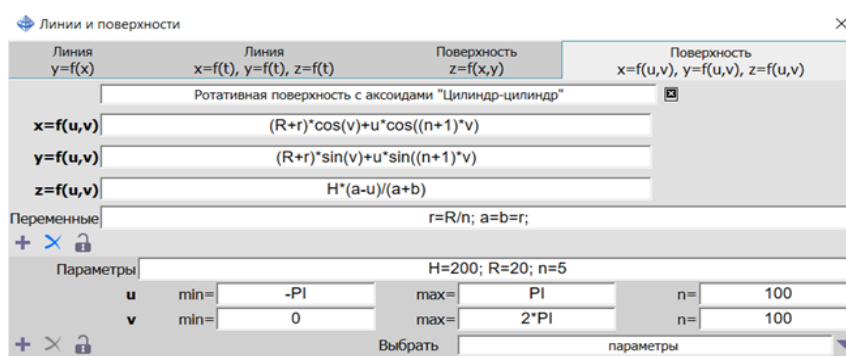


Рис. 2 - Генератор линий и поверхностей в ПК САПФИР

Fig. 2 - Generator of lines and surfaces in SAPFIR PC

На рис. 3 приведены ротативные поверхности с различными формами образования при варьировании параметра n . Что показывает, как зависит количество выпуклых частей поверхности в плоскости XY от параметра n . Для проектирования здания принята поверхность с пятью выпуклыми частями (рис. 3в).

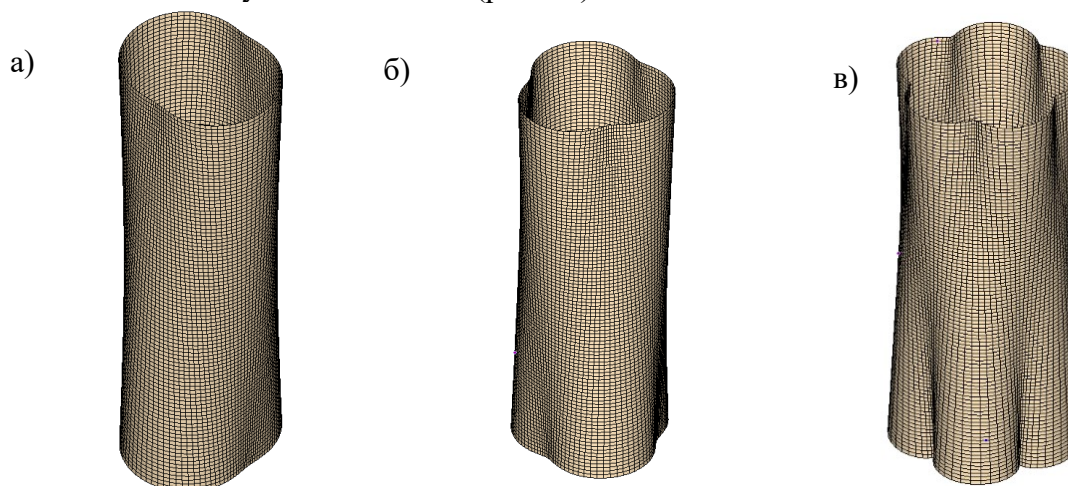


Рис. 3- Варьирование количеством выпуклых частей: а) $n = 2$; б) $n = 3$; в) $n = 5$

Fig. 3 - Varying the number of convex parts: а) ; б) ; в) .

На следующем этапе определена ширина раскрытия оболочки по верхнему контуру. Окончательно принимаем значение $-\pi \leq v \leq \pi$. При варьировании предела вращения прямой корректируются границы z и параметры v, H, R (рис. 4-6).

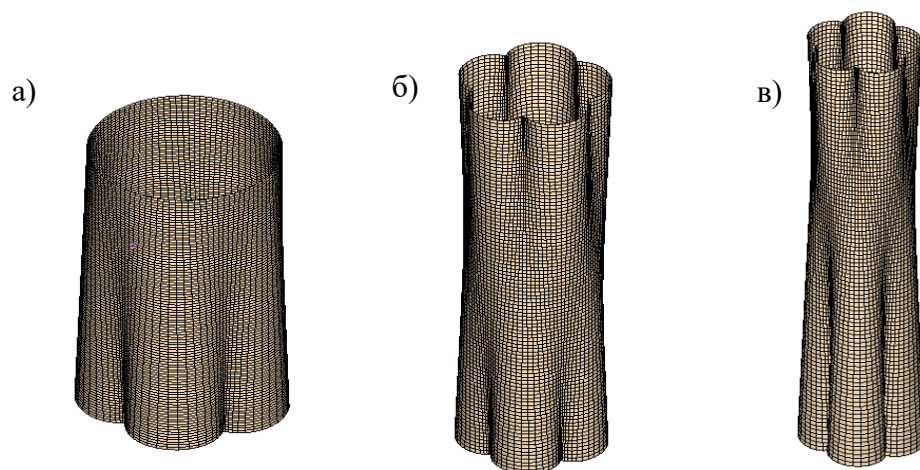


Рис. 4 - Варьирование параметра ν : а) $0 \leq \nu \leq \pi$; б) $-\pi \leq \nu \leq \pi$; в) $-\pi \leq \nu \leq 2\pi$

Fig. 4 - Variation of the parameter: а) $0 \leq \nu \leq \pi$; б) $-\pi \leq \nu \leq \pi$; в) $-\pi \leq \nu \leq 2\pi$

При изменении параметра H , подбираем оптимальную высоту здания, принято $H = 112$ (рис.5).

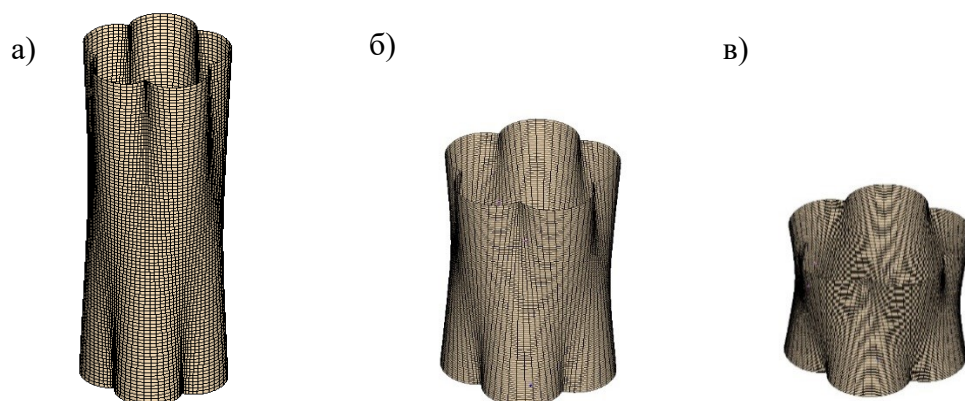


Рис. 5- Варьирование параметра H : а) $H = 200$; б) $H = 100$; в) $H = 50$

Fig. 5- Variation of parameter H : а) $H = 200$; б) $H = 100$; в) $H = 50$

При изменении параметра R , от которого зависит радиус цилиндра, вокруг которого происходит обкатывание, мы влияем на радиус раскаты оболочки. В работе принято значение $R = 20$.

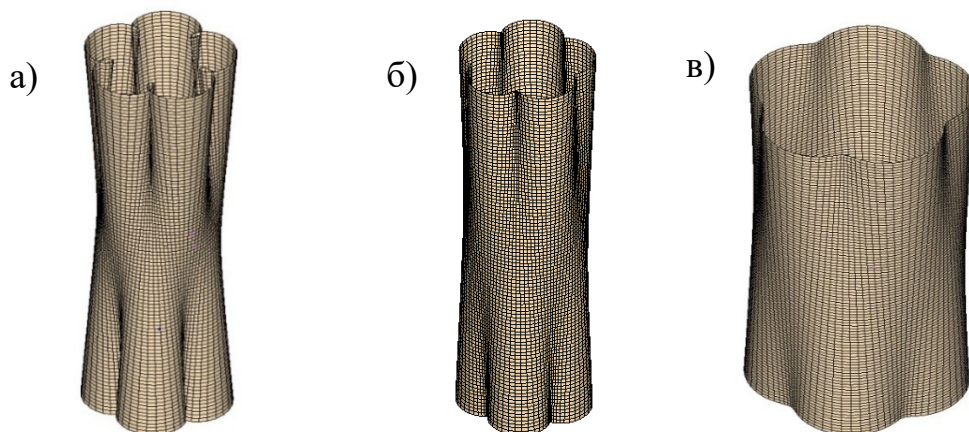


Рис. 6 - Варьирование параметра R : а) $R = 15$; б) $R = 20$; в) $R = 30$

Fig. 6 - Variation of parameter R : а) $R = 15$; б) $R = 20$; в) $R = 30$

При вариации числа конечных элементов изменяется обтекаемость формы (рис. 7).

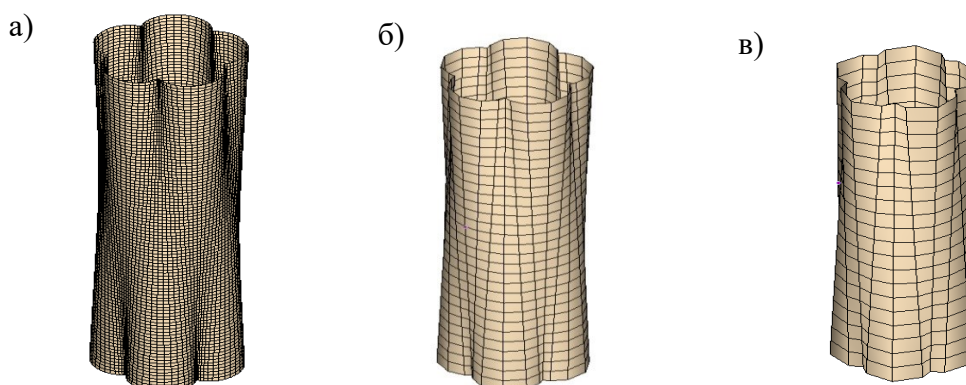


Рис. 7-Варьирование количества конечных элементов по периметру поверхности:

а) 50 конечных элементов; б) 30 конечных элементов; в) 20 конечных элементов

Fig. 7-Variation of the number of finite elements along the surface perimeter:

a) 50 finite elements; б) 30 finite elements; c) 20 finite elements

Обсуждение результатов. Создание физической (архитектурной) и аналитической модели объекта исследования реализовано в программных комплексах из одного семейства – ЛИРА САПР 2020 R3.1 и САПФИР-3D 2020 R3.1. Программа САПФИР удобна тем, что реализует в себе принцип дуального представления модели, суть которого заключается в том, что оба типа модели обрабатываются совместно, позволяя создавать проект из различных элементов, оперируя их архитектурными моделями (стена, колонна, плита, стропильные конструкции и другие), и в то же время – незаметно формируя основу для расчета. Ввиду общего родства программ передача аналитической модели из САПФИР в ЛИРА для осуществления комплекса вычислительных процессов происходит без каких-либо проблем.

Формирование каркаса начинается с построения фундаментной плиты, плит перекрытия и плиты покрытия, которые повторяют форму модели. Исходя из их форм и размеров подбираются оптимальные сечения вертикальных несущих элементов (рис. 8).

Фундаментная плита принята монолитная железобетонная толщиной 1600 мм из бетона B40 W12 F200 [7]. Плиты перекрытий и плита покрытия приняты толщиной 220 мм из бетона B60 W4 F75. Размеры ядра жесткости приняты исходя из расчета количества вертикального транспорта. Стены приняты толщиной 300 мм из бетона B60 W4 F75.

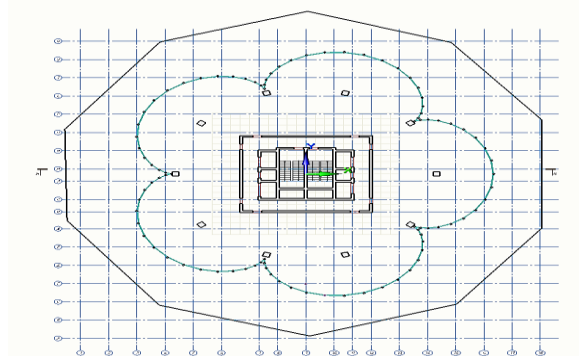


Рис. 8 - План 1-го этажа

Fig. 8 - 1st floor plan

В связи с тем, что форма имеет различный радиус, на первом и последнем этаже, максимальный, а на 18-ом минимальный, принято решение установить колонны в краях «лепестка», первого и последнего этажа, сечением 700x700 из бетона B60 W4 F75.

Для устранения консольности на краях плит принято решение установить по контуру поверхности металлический каркас, из труб 219x8 мм из стали С245 по ГОСТ 10704-91 (рис. 9). Для обеспечения жесткости здания запроектированы аутригерные конструкции на 11-ом, 22-ом и 33-ом этажах [8-9].

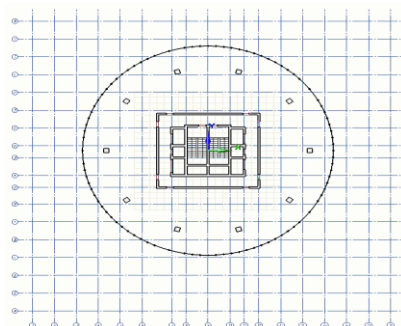


Рис. 9- План 18-го этажа
Fig. 9 - 18th floor plan

Это стены толщиной 300 мм, которые проходят от ядра жесткости, пересекаясь с колоннами, связывая их и проходят через центр «лепестка» (рис. 10) [10-11].

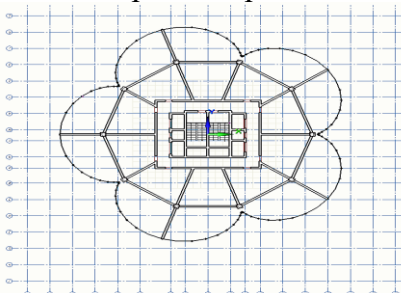


Рис. 10- План 34-го аутриггерного этажа
Fig. 10 - Plan of the 34th outrigger floor

После построения архитектурной модели выполнено преобразование в аналитическую (рис. 11).

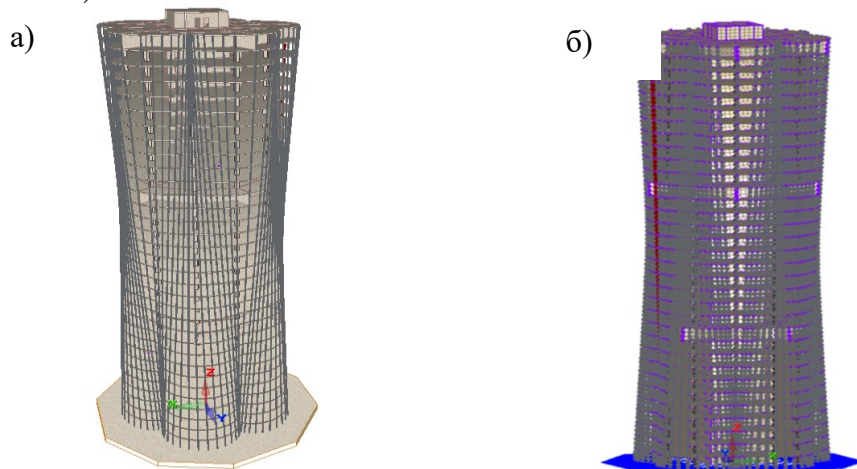


Рис. 11- Модели здания: а) физическая; б) аналитическая
Fig. 11- Building models: a) physical; b) analytical

Для этого настроены параметры сетки триангуляции. В процессе преобразования выполняется автоматическое двойное дотягивание, исправление возможных ошибок конструкций и передача созданной модели в ПК ЛИРА-САПР.

Элементам каркаса назначены типы жесткости (рис. 12): фундаментная плита – пластина толщиной 160 см; плиты перекрытий и покрытия – пластина толщиной 22 см; стены ядра жесткости, лифтовых шахт и лестничных клеток – пластина толщиной 30 см; стены аутриггерных конструкций – пластина толщиной 30 см; прямые колонны – брус 70x70 см; металлические колонны – труба круглая 219x8.

Модальный анализ проведен для первого варианта моделирования системы. Сформировано отдельное динамическое нагружение, для которого происходит сбор масс со всех ранее приложенных статических нагружений, включая собственный вес конструкций.

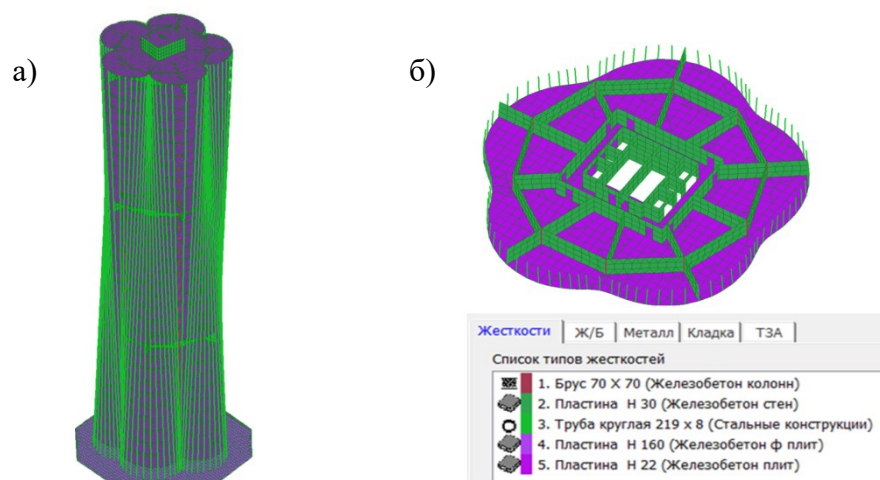


Рис. 12 - Жесткости конечно-элементной модели: а) модель здания; б) аутриггерный этаж
Fig. 12 - Stiffness of the finite element model: a) building model; b) outrigger floor

Первая форма колебаний каркаса – поступательная вдоль направляющей, находящейся относительно оси ОУ (рис. 13а). Вторая форма колебаний каркаса – поступательная вдоль направляющей, находящейся относительно оси ОХ (рис.13б). Третья форма колебаний каркаса – кручение относительно центра здания (рис.13в).

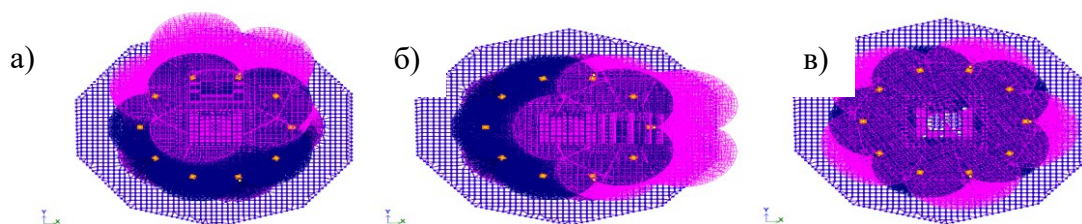


Рис. 13- Формы колебаний каркаса: а) 1 форма; б) вторая форма; в) третья форма
Fig. 13 - Frame oscillation modes: a) 1 mode; b) second mode; c) third mode

Во всех каркасах главные формы колебаний представляют собой поступательные и крутильные. Расстановка диафрагм жесткости (колонн и стен) подобрана верно, обеспечивая достаточную жесткость здания. Выполнен расчет по деформациям на действие постоянных, временных длительных и кратковременных нагрузок (рис. 14, 15).

Проведено сравнение прогибов, горизонтальных перемещений и ускорений этажей с предельно допустимыми значениями.

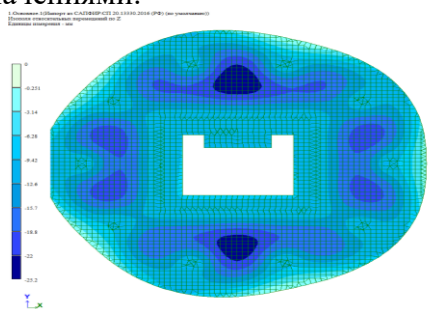


Рис. 14- Изополя относительных вертикальных перемещений
Fig. 14 - Isofields of relative vertical displacements

Максимальный прогиб плиты перекрытия составил 25.2 мм. В соответствии с действующей нормативной документацией вертикальный предельный прогиб не должен превышать $L/200$. Пролет в месте максимального прогиба составил 6800 мм, прогиб не должен превышать $6800/205 = 25.2$ мм. Следовательно, предельные прогибы не превышают максимально допустимых значений. Предельные горизонтальные деформации составляют $f_{ult} = 3.06$ мм, при высоте здания 112.4 м, что не превышает предельно допустимых значений $f_{ult} = h/500 = 112400/500 = 224.8$ мм.

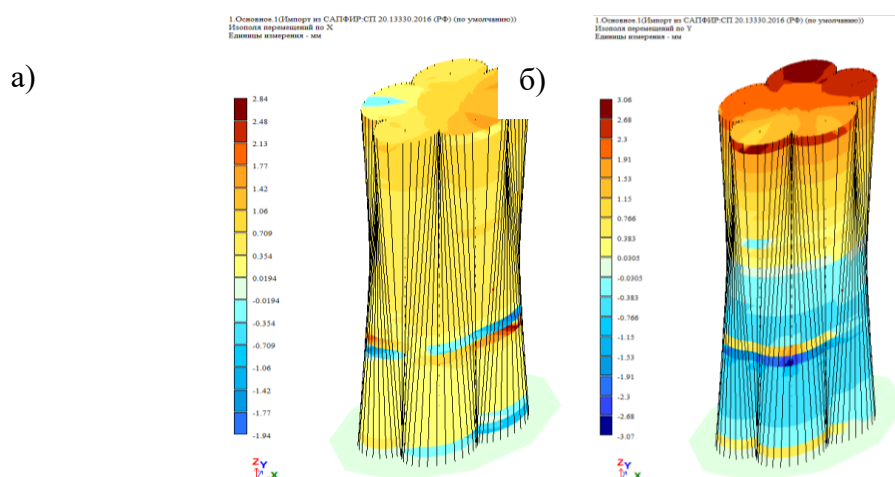


Рис. 15 - Горизонтальные перемещения: а) по оси X; б) по оси Y

Fig. 15 - Horizontal movements: а) along the X axis; б) along the Y axis

Вывод. Проведенное исследование эволюции формообразования объекта параметрической архитектуры позволяет выбрать оптимальный вариант аналитической ротативной поверхности. Разработана аналитическая модель каркаса уникального здания высотой 112 м. Импорт в программный комплекс Лира-САПР позволил получить расчетную схему объекта. Методом конечных элементов определено напряженно-деформированное состояние и динамические характеристики полученных моделей для оценки надежности, устойчивости и экономичности принятых проектных решений. Разработанные конструктивные решения зданий параметрической архитектуры полностью отвечают требованиям норм Российской Федерации.

Библиографический список:

- Надыршин Н.М. Параметризм как стиль в архитектурном дизайне. Вестник ОГУ. 2013. № 1. С. 53-57.
- Барцайкин Д.О. Обзор конструктивных решений высотных зданий //Международный научный журнал «Вестник науки», 2020, № 7(28), Т.4. С.35-38. <https://www.xn--8sbempeclwd3bmt.xn--plai/article/3470>
- Кравченко Г.М., Манойленко А.Ю., Литовка В.В. «Параметрическая архитектура»//Инженерный вестник Дона, № 2 (2018) URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/5040;
- Кравченко Г.М., Труфанова Е.В., Полетаев М.В., Пуданова Л.И.. Эволюция формообразования здания параметрической архитектуры с учетом аэродинамики. Инженерный вестник Дона, 2021, № 8;
- Шенцова О.М., Казанцева Е.К. Композиционное формообразование высотных зданий и сооружений. Евразийский союз ученых. 2017. № 11-1 (44). С. 5-12.
- Кравченко Г.М., Труфанова Е.В., Данилейко И.Ю., Забейворота В.А. Исследование принципов формообразования объектов параметрической архитектуры. Инженерный вестник Дона, 2019, № 3.
- Доствал Г., Хая В. Применение высокопрочных бетонов в конструкциях современных высотных зданий // Научно-образовательный журнал для студентов и преподавателей «StudNet» № 6/2022;
- А.Б. Малыгин «Применение аутигерных этажей в высотном строительстве» //Инженерный вестник Дона, № 4 (2022) URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2022/7585;
- Н.И. Закиева, Д.В. Гранкина, К.А. Ким, Д.К. Васильева. Процесс прогрессирующего обрушения высотных зданий и анализ решений, противодействующих ему//Инженерный вестник Дона, № 3 (2019) URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2019/5811;
- Алмазов В.О. Проблемы прогрессирующего обрушения. Строительство и реконструкция. 2014. № 6(56). С.3-10.
- Алмазов В.О., Плотников А.И., Расторгуев Б.С. Проблемы сопротивления зданий прогрессирующему разрушению. Вестник МГСУ. 2011. № 2. С. 15-20.
- Агаханов Э.К., Кравченко Г.М., Труфанова Е.В., Агаханов М.К. Применение информационных технологий при моделировании объекта параметрической архитектуры. Системные технологии. 2023. № 2(47). с. 51-58.
- Агаханов Э.К. О развитии комплексных методов решения задач механики деформируемого твердого тела». Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки, 2013;29(2):39-45. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2013-29-2-39-45>.
- Агаханов Э.К. Развитие комплексных методов в механике деформируемого твердого тела, Материалы Международной научно-практической конференции, ГГНТУ, г. Грозный, 2015. с. 99-105.

15. Агаханов Э. К., Агаханов М. К., Труфанова Е. В., Высоковский Д.А., Джабраилов А.З. Влияние конструктивных решений при динамическом расчете каркаса здания сложной формы. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024; 51(1):180-186. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2024-51-1-180-186>

References:

1. Nadyrshin N.M. Parametricism as a style in architectural design. *Bulletin of OSU*. 2013;1:53-57 (In Russ.)
2. Bartsaykin D.O. Review of design solutions for high-rise buildings. *International scientific journal "Bulletin of science"* 2020; 7 (28) Vol. 4:35-38; <https://www.xn-8sbemcplcwwd3bmt./article/3470> (In Russ.)
3. Kravchenko G.M., Manoylenko A.Yu., Litovka V.V. Parametric architecture. *Engineering Bulletin of the Don*, 2018; 2 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/5040/; (In Russ.)
4. Kravchenko G.M., Trufanova E.V., Poletaev M.V., Pudanova L.I. Evolution of the formation of a parametric architecture building taking into account aerodynamics. *Engineering Bulletin of the Don*, 2021;8; (In Russ.)
5. Shentsova O.M., Kazantseva E.K. Compositional shaping of high-rise buildings and structures. *Eurasian Union of Scientists*. 2017;11-1 (44):5-12. (In Russ.)
6. Kravchenko G.M., Trufanova E.V., Danileiko I.Yu., Zabeyvorota V.A. Study of the principles of shaping parametric architecture objects. *Engineering Bulletin of the Don*, 2019;3. (In Russ.)
7. Dostvala G., Khaya V. Application of high-strength concrete in the structures of modern high-rise buildings // Scientific and educational journal for students and teachers "StudNet" No. 6/2022; (In Russ.)
8. B. Malygin "Use of outrigger floors in high-rise construction. *Engineering Bulletin of the Don*, 2022;4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2022/7585/; (In Russ.)
9. N.I. Zakieva, D.V. Grankina, K.A. Kim, D.K. Vasilyeva "The process of progressive collapse of high-rise buildings and analysis of solutions to counteract it. *Engineering Bulletin of the Don*, 2019;3 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2019/5811/ (In Russ.)
10. Almazov V.O. Problems of progressive collapse. *Construction and reconstruction*. 2014;6(56):3-10 (In Russ)
11. Almazov V.O., Plotnikov A.I., Rastorguev B.S. Problems of resistance of buildings to progressive destruction. *Bulletin of MGSU*. 2011;2:15-20. (In Russ)
12. Agakhanov E.K., Kravchenko G.M., Trufanova E.V., Agakhanov M.K. Application of information technologies in modeling an object of parametric architecture. *System technologies*. 2023;2(47):51-58. (In Russ.)
13. Agakhanov E.K. On the development of complex methods for solving problems of mechanics of deformable solids. *Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences*. 2013; 29(2):39-45. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2013-29-2-39-45> (In Russ.)
14. Agakhanov E.K. Development of complex methods in mechanics of deformable solids, Proceedings of the International scientific and practical conference, GGNTU, Grozny, 2015; 99-105. (In Russ.)
15. Agakhanov E.K., Agakhanov M.K., Trufanova E.V., Vysokovsky D.A., Dzhabrailov A.Z. Influence of design solutions in the dynamic calculation of the frame of a complex-shaped building. *Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences*. 2024;51(1):180-186. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2024-51-1-180-186> (In Russ.)

Сведения об авторах:

Агаханов Элифхан Керимханович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Транспортные сооружения и строительные материалы»; Elifhan@bk.ru

Агаханов Мурад Керимханович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Сопроотивление материалов»; muradak@mail.ru

Труфанова Елена Васильевна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Строительная механика и теория сооружений»; el.trufanova@mail.ru

Джабраилов Адалет Залович, аспирант кафедры «Транспортные сооружения и строительные материалы», zalovich84@mail.ru

Information about authors:

Elifkhan K. Agakhanov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Department of Transport Facilities and Construction Materials; Elifhan@bk.ru,

Murad K. Agakhanov, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Assoc. Prof., Department of Strength of Materials; muradak@mail.ru

Elena V. Trufanova, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Assoc. Prof., Department of Technical Mechanics; el.trufanova@mail.ru

Adalet Z. Dzhabrailov, Postgraduate Student, Department of Transport Structures and Building Materials, zalovich84@mail.ru

Конфликт интересов / Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/ Received 24.09.2024.

Одобрена после рецензирования / Reviced 17.11.2024.

Принята в печать /Accepted for publication 20.01.2025.