

Использование параметрической поверхности диагонального переноса при проектировании большепролетного выставочного павильона

Э.К. Агаханов¹, М.К. Агаханов², Е.В. Труфанова³, Г.М. Муртазалиев¹

¹ Дагестанский государственный технический университет,

¹367015, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70, Россия,

² Московский государственный строительный университет,

²129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26, Россия,

³ Донской государственный технический университет,

³344002, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является моделирование и расчет каркаса здания большепролетного выставочного павильона, созданного с использованием поверхности диагонального переноса, на особые сейсмические воздействия по нормативному методу с учетом эксплуатационных статических и динамических воздействий, а также регулирование усилий и перемещений в элементах каркаса здания способом изменения геометрической схемы. **Метод.** Каркас уникального здания разработан на основе изучения эволюции поверхности диагонального переноса в программных комплексах ArchiCAD, САПФИР и Лира-САПР. **Результат.** На первом этапе проектирования производился численный эксперимент по регулированию напряженно-деформированного состояния каркаса здания. Выполнен расчет отдельных элементов здания для определения оптимальной расчетной схемы и предварительного подбора сечений элементов. Рассмотрено два варианта арок покрытия. Выполнено варьирование физико-механических и геометрических параметров несущих конструкций. По результатам численного эксперимента выбрана окончательная расчетная схема здания и выполнен полный динамический расчет каркаса с учетом сейсмического воздействия. **Вывод.** Получены перемещения узлов конечно-элементной модели в глобальной системе координат, а также усилия в несущих элементах каркаса. Выполнен дополнительный расчет на устойчивость арочного покрытия. По результатам анализа полученных данных выбран рациональный вариант конструирования каркаса здания.

Ключевые слова: информационное моделирование, параметрическая архитектура, формообразование, численный эксперимент, регулирование напряженно-деформированного состояния, метод конечных элементов

Для цитирования: Э.К. Агаханов, М.К. Агаханов, Е.В. Труфанова, Г.М. Муртазалиев. Использование параметрической поверхности диагонального переноса при проектировании большепролетного выставочного павильона. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025;52(4):188-195. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-4-188-195

Using a parametric diagonal transfer surface in the design of a large-span exhibition pavilion

E.K. Agakhanov¹, M.K. Agakhanov², E.V. Trufanova³, G.M. Murtazaliev¹

¹Daghestan State Technical University,

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

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

²26 Yaroslavskoe highway, Moscow129337, Russia,

³Don State Technical University,

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

Abstract. Objective. Modeling and calculation of the building frame of a large-span exhibition pavilion, created using a diagonal transfer surface, for special seismic impacts using a standard method taking into account operational static and dynamic impacts, as well as regulation of forces and displacements in the elements of the building frame by changing the geometric scheme. **Method.** The framework of the unique building was developed based on the study of the evolution of the diagonal transfer surface in the ArchiCAD, SAPFIR and Lira-SAPR software packages. **Result.** At the first stage of design, a numerical experiment was conducted to regulate the stress-strain state of the building frame. The calculation of individual elements of the building was performed to determine the optimal calculation scheme and preliminary selection of element sections. Two options for roof arches were considered. The physical, mechanical and geometric parameters of the supporting structures were varied. Based on the results of the numerical experiment, the final calculation scheme of the building was selected and a full dynamic calculation of the frame was performed taking into account seismic impact. **Conclusion.** The displacements of the finite element model nodes in the global coordinate system, as well as the forces in the supporting elements of the frame, were obtained. An additional calculation for the stability of the arched roof was performed. Based on the analysis of the data obtained, a rational option for constructing the building frame was selected.

Keywords: information modeling, parametric architecture, forming, numerical experiment, regulation of the stress-strain state, finite element method

For citation: E.K. Agakhanov, M.K. Agakhanov, E.V. Trufanova, G.M. Murtazaliev. The use of a parametric diagonal transfer surface in the design of a large-span exhibition pavilion. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025;52(4):188-195. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-4-188-195

Введение. Современные объекты строительства являются сложными многоэлементными системами, для которых зачастую необходимы многовариантные расчеты. В настоящее время являются актуальными задачи оптимального проектирования объектов строительства, регулирования усилий и перемещений в элементах конструкций на различных стадиях их работы, а также проектирования конструкций наименьшего объема. Особую сложность представляют расчеты с учетом динамических нагрузок.

К динамическим расчетам относятся расчеты на сейсмические воздействия, которые характеризуются низкой предсказуемостью и высокой интенсивностью. Современные строительные нормы, как отечественные, так и зарубежные, предполагают учет особых, в том числе сейсмических, воздействий в комплексе с эксплуатационными нагрузками, что требует от проектировщика ответственного подхода к созданию расчетной модели сооружения.

Постановка задачи. В качестве конструктивного решения применены сводчатые арочные покрытия пролетом 30 метров с шагом арок 12 метров.

Поверхности диагонального переноса образуются по принципу переноса плоской кривой по направляющей так, что при скольжении образующей кривой по плоскому неподвижному контуру, две ее симметричные точки непрерывно его касаются. Такая поверхность может быть образована на контуре самопроизвольного очертания. Наибольший интерес представляют поверхности, образованные на контуре с симметрией (окружности, эллипсы, квадраты и прямоугольники) (рис.1).

Рассмотрена эволюция формообразования поверхности диагонального переноса для плоского ромбического контура. Поверхности диагонального переноса относятся к аналитическим поверхностям. Аналитическая поверхность – это абстрактное двумерное комплексное аналитическое многообразие, снабженное комплексной структурой.

Поверхность переноса может быть задана образующей линией в начальном положении и некоторой направляющей кривой, определяющей направление переноса, либо при помощи соотношений координат по осям X и Y [1].

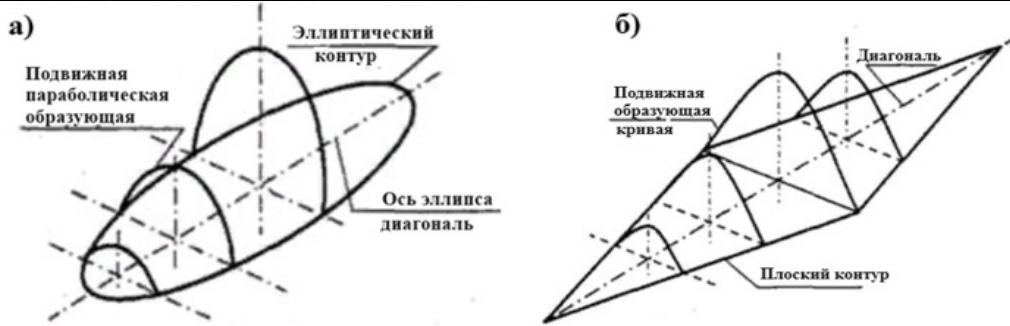


Рис. 1 – Поверхности, образованные на контуре с симметрией:
 а) подвижной параболической образующей; б) кривой подвижной образующей
Fig. 1 – Surfaces formed on a contour with symmetry:
 a) a moving parabolic generatrix; b) a curved moving generatrix

Для построения поверхности диагонального переноса для плоского ромбического контура могут быть полезны следующие соотношения между декартовыми координатами x, y и косоугольными координатами u, v .

$$x = \frac{(u+v) \cdot c}{\sqrt{c^2 + d^2}} - c; \quad y = \frac{(v-u) \cdot d}{\sqrt{c^2 + d^2}},$$

где c и d – свободные числа.

Для создания поверхности было подобрано соотношение:

$$c = 2, \quad d = 1, \quad H = 24, \quad a = 20, \quad b = 4.$$

За основу была взята формула:

$$z = -\frac{y^2}{a} + H - \frac{\sqrt{x}}{b},$$

где x и y – соответственно соотношения между декартовыми координатами x, y ;
 H – нужная высота по z ;
 a и b – свободные числа.

Приняты следующие параметры: $c = 2, d = 1, H = 24, a = 20, b = 4$.

С помощью генератора линий и поверхностей в программном комплексе САПФИР, при свободно заданных числах создаем модель (рис. 2).

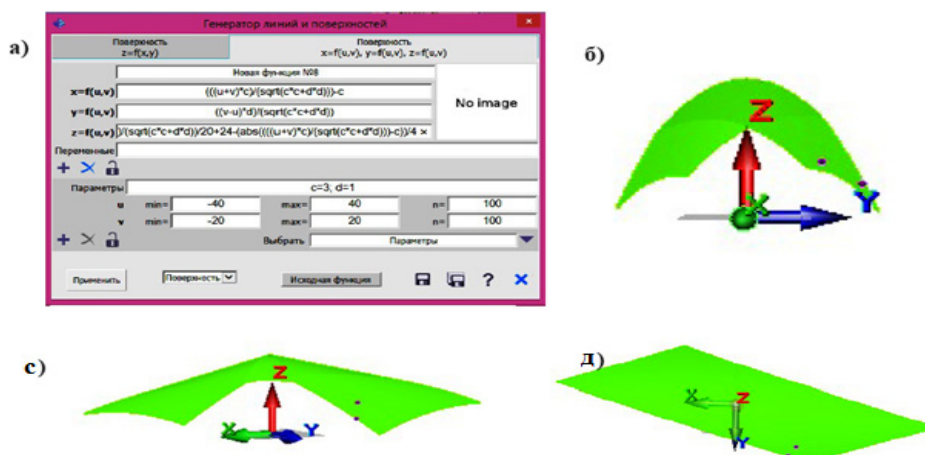


Рис. 2 – Создание поверхности: а) генератор; б) вид сверху; с) справа; д) сзади
Fig. 2 – Surface creation: a) generator; b) top view; c) right; d) back

Выполнен подбор оптимальной формы поверхности диагонального переноса. При изменении числа c в меньшую сторону ($c = 1$) – боковые углы ромба уходят вниз (рис. 3а). При изменении числа c в большую сторону ($c = 5$) – ромб сужается, углы более прямые (рис. 3б). При уменьшении параметра d ($d = 0,5$) – ромб сужается, углы более

прямые (рис. 3с). При увеличении параметра d ($d = 5$) – боковые углы ромба уходят вниз (рис. 3д).

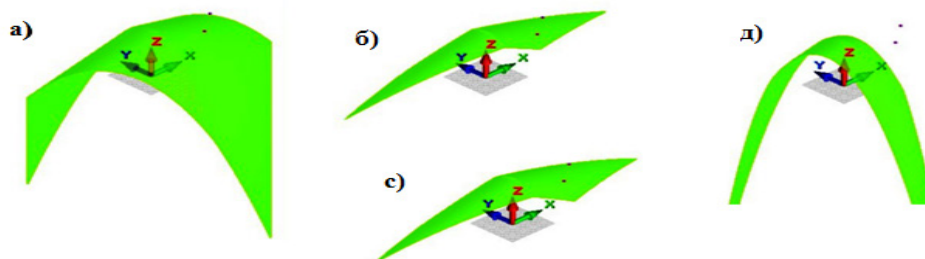


Рис. 3 – Изменение поверхности при смене числа c и d :

а) $c = 1$; б) $c = 5$; в) $d = 0,5$; д) $d = 5$

Fig. 3 – Change in surface area when changing the numbers c and d :

а) $c = 1$; б) $c = 5$; в) $d = 0,5$; д) $d = 5$

При изменении параметра a в меньшую сторону ($a = 5$) – форма расширяется, удлиняется, боковые углы уходят вниз (рис. 4а). При изменении числа a в большую сторону ($a = 50$) – форма удлиняется, сужается и сплющивается (рис. 4б). При изменении числа b в меньшую сторону ($b = 1$) – излом становится больше, внешние углы тянутся друг к другу (рис.4с). При изменении числа b в большую сторону ($b = 100$) – уходит излом, форма выпрямляется (рис. 4д).

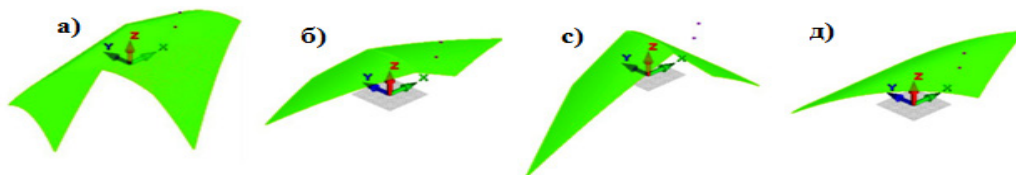


Рис. 4 – Изменение поверхности при смене числа a и b :

а) $a = 5$; б) $a = 50$; в) $b = 1$; д) $b = 100$.

Fig. 4 – Change in surface area when changing the numbers a and b :

а) $a = 5$; б) $a = 50$; в) $b = 1$; д) $b = 100$.

Концепция здания выставочного павильона разработана на основе варианта заданных параметрами: $c = 2$, $d = 1$, $H = 24$, $a = 20$, $b = 4$ (рис. 5а). Проектируемый объект – здание параметрической архитектуры с функциональным назначением выставочного павильона со свободной планировкой внутреннего пространства (рис. 5б) [2].

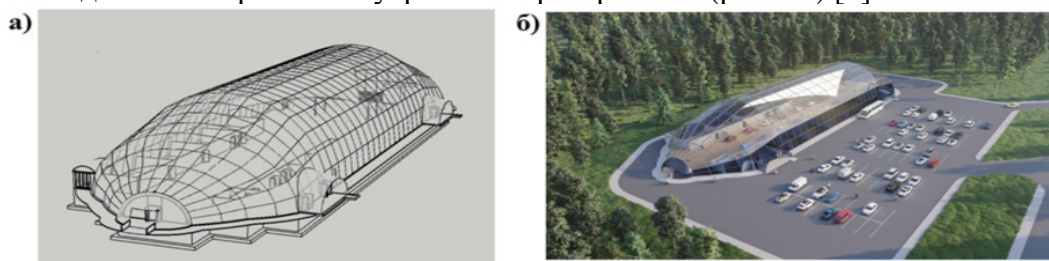


Рис. 5 – Выставочный павильон: а) концепция; б) визуализация

Fig. 5 – Exhibition pavilion: а) concept; б) visualization

Выставочный павильон, предназначен для комплектования выставок автомобильной техники и других экспозиционных выставок аналогичной тематики. Экспозиционный зал расположен в центральной части здания, техника заезжает в здание через ворота, расположенные в торце помещения. Вдоль наружных стен и в подвале располагаются бытовые и административно-хозяйственные помещения. Конструктивная схема здания – каркасная.

Арки металлические решетчатые бесшарнирные опираются на монолитные колонны подвала. Пояса и решетка из прямоугольного сварного профиля «Молодечно». Связи металлические из труб 108x12 по ГОСТ 8732-78. Металлические конструкции выполняются из стали классов С245 и С345.

Под центральной частью здания располагается подвал, в котором предполагается размещение инженерного оборудования и вспомогательных помещений. Высота подвала 3м. Ленточные фундаменты на естественном основании монолитные железобетонные шириной 400–2000 мм из бетона класса В40. Перекрытие подвала монолитное железобетонное толщиной 2500 мм из бетона класса В30. Колонны подвала монолитные железобетонные сечением 400x400 мм из бетона класса В30. Несущие стены подвала монолитные железобетонные из бетона класса В40.

Методы исследования. Выполнен численный эксперимент по регулированию напряженно-деформированного состояния несущих конструкций в программном комплексе Лира-САПР [3-4]. Произведен предварительный расчет средней арки сводчатого покрытия (рис. 6). Рассмотрено два варианта расчетной схемы:

- в первом варианте стрела подъема арки составляет 10 м при пролете 30м ($f/L=1/3$);
- во втором стрела подъема составляет 15м при пролете 30м ($f/L=1/2$).

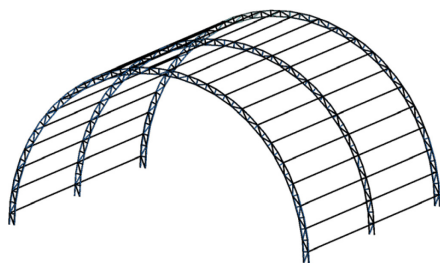


Рис. 6 – Арки покрытия
Fig. 6 – Roof arches

В рассмотренных случаях арки являются высокими ($f/L > 1/4$), очерченными по дуге окружности. Поперечное сечение элементов - 2 уголка 75x6. Основной нагрузкой является собственный вес конструкции и снеговая нагрузка. Нагрузка от снега определяется по требованиям нормативной документации. Величина собственного веса линейно зависит от геометрических параметров арки и достигает наибольшего значения во втором варианте геометрической схемы при $f/L = 1/2$.

Арка является распорной системой. Величина распора при постоянной нагрузке зависит от геометрических параметров конструкции. Для данной арки пролетом 30 м при стреле подъема в 15 м величина распора значительно меньше, чем при стреле подъема 10 м, что значительно упрощает конструкцию фундаментов. Малый распор снимает необходимость увеличивать высоту сечения арки у опор, что позволяет рациональнее использовать площадь внутренних помещений. Учитывая данные обстоятельства, а также то, что в обоих вариантах геометрических схем величина собственного веса конструкций значительно меньше полезных нагрузок, за основной принят второй вариант расчетной схемы.

Для проверки и подбора сечений элементов арки заданы две схемы загрузки снеговой нагрузкой в соответствии с требованиями действующей нормативной документации (рис. 7 а-б).

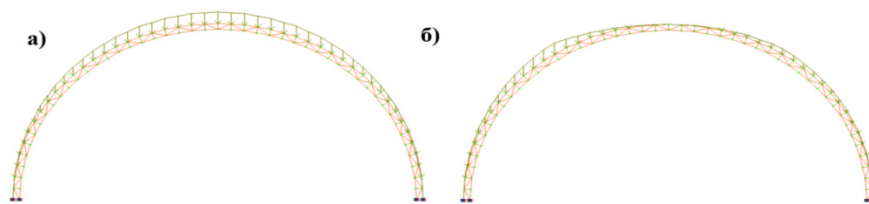


Рис. 7 – Схемы нагрузки от снега: а) первая схема; б) вторая схема
Fig. 7 – Snow load diagrams: a) first diagram; b) second diagram

Обсуждение результатов. Произведен статический расчет. Наибольшие усилия возникают при первом варианте загрузки снеговой нагрузкой. Именно эти усилия, а также характеристики конструктивных элементов являются исходными данными для проверки и подбора сечений.

Выполнен подбор сечений элементов арочного покрытия. После подбора сечений произведен повторный расчет. Наибольшие перемещения составляют 99,6 мм, что не превышает допустимого значения $l/275 = 30000/275 = 109$ мм, следовательно, выбранная расчетная схема пригодна для дальнейших расчетов.

Для определения усилий и подбора сечений и армирования элементов конструкций рассмотрена расчетная схема, представляющая собой пространственную плитно-стержневую систему (колонны, балки, элементы покрытия), разработанная в программном комплексе Лира-САПР (рис. 8) [5-6].

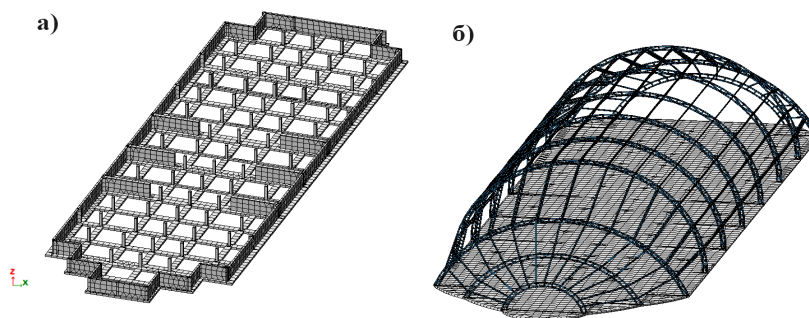


Рис. 8 – Конечно-элементная модель: а) подвал; б) первый этаж

Fig. 8 – Finite element model: a) basement; b) first floor

Конструкция рассчитана на 13 загрузок: 8 статических, 2 динамических и 6 особых. В статические нагрузки включены собственный вес, постоянные, длительные, кратковременные, снеговые (2 варианта), ветер вдоль и поперек здания. В динамических нагрузках учтена пульсационная составляющая ветровой нагрузки. Особыми нагрузками выполнено моделирование сейсмических нагрузок по главным осям здания (включая вертикальную составляющую).

Количество форм колебаний, учитываемых при расчете на сейсмическую нагрузку, в первом приближении составляющее 20, было затем увеличено до 1500, а вместо жесткого закрепления основания по направлениям X , Y введены податливые заделки [7-8]. Это решение позволяет увеличить сумму эффективных модальных масс, учтенных в расчете, до 90% для соответствия расчета требованиям действующей нормативной документации (рис. 9) [9]. Выполнен общий расчет каркаса здания. Анализ результатов показал, что полученные компоненты напряженно-деформированного состояния с учетом динамических и особых воздействий не превышают нормативных значений, принятых сечений металлического каркаса здания достаточно [10-11].

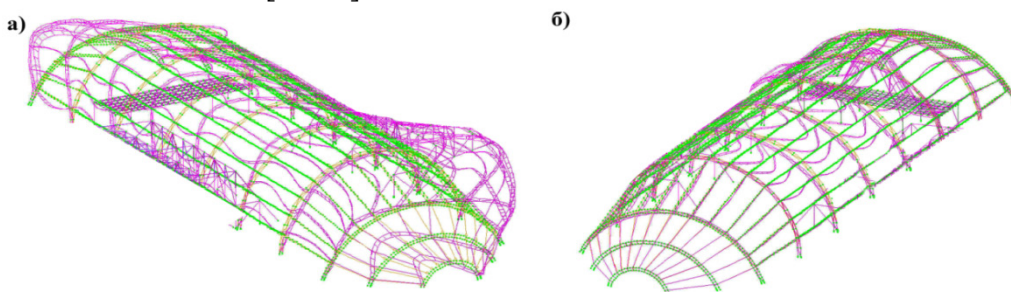


Рис. 9 – Формы колебаний: а) 7-я форма; б) 157-я форма

Fig. 9 – Oscillation modes: a) 7th mode; b) 157th mode

Дополнительно произведен расчет каркаса на устойчивость в двух расчетных сочетаниях: с ветром в поперечном направлении и с ветром в продольном направлении. На рис. 10 показаны первые формы потери устойчивости.

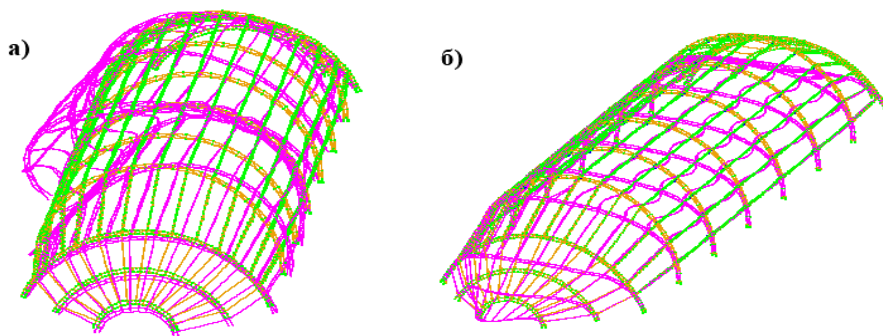


Рис. 10 – Первая форма потери устойчивости:
а) в первом расчетном сочетании; б) во втором расчетном сочетании
Fig. 10 – First form of stability loss:
a) in the first design combination; b) in the second design combination

Наименьший коэффициент запаса составляет 5,07, что превышает минимально допустимый по актуальной нормативной документации.

Вывод. Выполненное исследование формообразования поверхности диагонального переноса показало, что разработанная концепция аналитической поверхности подходит для проектирования каркаса здания выставочного павильона. Проведенный численный эксперимент позволил разработать оптимальную расчетную схему проектируемого объекта параметрической архитектуры. Исследование поведения каркаса здания при проектных воздействиях, включая исследование динамического отклика и устойчивости покрытия, позволило считать принятые конструктивными решения надежными и экономичными.

Библиографический список:

1. Гринько Е.А. Классификация аналитических поверхностей применительно к параметрической архитектуре и машиностроению. Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. – 2018. – Т. 19, № 4. – С. 438-456.
2. Кравченко Г.М., Данилейко И.Ю., Думбай В.А. Исследование динамических параметров консольного покрытия уникального здания технического музея. НАУКА, ОБРАЗОВАНИЕ и ИННОВАЦИИ: сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции: в 3 частях, Казань, 12 июля 2017 года. Том Часть 2. – Казань: Общество с ограниченной ответственностью "Агентство международных исследований", 2017. – С. 68-73.
3. Водопьянов Р.Ю., Титок В.П., Артамонова А.Е., Ромашкина М.А. Под редакцией академика РААСН Городецкого А.С. Программный комплекс лира-сапр®. Руководство пользователя. Обучающие примеры. Электронное издание, 2017г., – 535 с.
4. Стрелец-Стрелецкий Е.Б., Журавлев А.В., Водопьянов Р.Ю. Под ред. Академика РААСН, док. техн. наук проф. Городецкого А.С. ЛИРА-САПР. Книга I. Основы. Изд-во LIRALAND, 2019. – 154с.
5. Agakhanov, E.K. Stress modelling in natural foundation /E.K. Agakhanov, R.E. Agakhanova, M.K. Agakhanov //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Rostov-on-Don, 20–22 октября 2020 года. Rostov-on-Don, 2020. – P. 012072. DOI 10.1088/1757-899X/1001/1/012072. EDN UXTXEO.
6. Агаханов, Э.К. Эквивалентность грунтов в предельном напряженном состоянии / Э.К. Агаханов, М.К. Агаханов, Г.Г. Габибулаев //Системные технологии. – 2021. – № 4(41). – С. 103-109. – DOI 10.55287/22275398_2021_4_103.
7. Моделирование пульсационной составляющей ветровой нагрузки на каркас здания по нескольким методикам расчета / Г.М. Кравченко, Е.В. Труфанова, И.В. Кондрик, И.А. Хатхоху // Инженерный вестник Дона. – 2017. – № 2(45). – С. 98.
8. Simbirkin V. Analysis of Reinforced Concrete Loadbearing Systems of Multistorey Buildings. Modern Building Materials, Structures and Techniques: CD-ROM Proceedings of the 8th International Conference, Vilnius, May 19-21, 2004.c.98-99.
9. Туровский С.В. Влияния собственных форм колебания многоэтажного каркасного здания на пространственную работу сооружения//Вестник современных исследований. 2019. № 3.13(30). – С. 184-187.
10. Кравченко Г.М. Рациональное проектирование элементов пространственного каркаса здания / Г.М. Кравченко, Е. В. Труфанова, Е. В. Ладная //Инженерный вестник Дона. – 2017. – № 1(44). – С. 59.
11. Адищев, В.В. Верификация численно-аналитического метода определения прогибов с помощью численного моделирования / В.В. Адищев, В.В. Мальцев, М.Н. Данилов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2017. – № 9(705). – С. 15-24.

References:

1. Grinko, E.A. Classification of Analytical Surfaces Applied to Parametric Architecture and Mechanical Engineering. *Bulletin of Peoples' Friendship University of Russia. Series: Engineering Research*. 2018;19(4):. 438-456. (In Russ)
2. Kravchenko, G.M., Danileiko, I.Yu., Dumbay, V.A. Study of the Dynamic Parameters of the Cantilever Roof of a Unique Building of a Technical Museum. SCIENCE, EDUCATION, and INNOVATION: Collection of Articles Based on the Results of the International Scientific and Practical Conference: in 3 Parts, Kazan, July 12, 2017; Part 2. – Kazan: International Research Agency, Limited Liability Company, 2017: 68-73. (In Russ)
3. Vodopyanov R.Yu., Titok V.P., Artamonova A.E., Romashkina M.A. Edited by Academician of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences Gorodetsky A.S. LIRA-SAPR® Software Package. User's Manual. Tutorials. Electronic publication, 2017:535. (In Russ)
4. Strelets-Streletsky E.B., Zhuravlev A.V., Vodopyanov R.Yu. Edited by Academician of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Doctor of Engineering Sciences, prof. Gorodetsky A.S. LIRA-SAPR. Book I. Basics. LIRALAND Publishing House, 2019:154. (In Russ)
5. Agakhanov, E.K. Stress modeling in natural foundation /E.K. Agakhanov, R.E. Agakhanova, M.K. Agakhanov //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Rostov-on-Don, October 20–22, 2020. Rostov-on-Don, 2020. – P. 012072. DOI 10.1088/1757-899X/1001/1/012072. EDN UXTXEO. (In Russ)
6. Agakhanov, E.K. Equivalence of soils in the ultimate stress state / E.K. Agakhanov, M.K. Agakhanov, G.G. Gabibulaev. *System technologies*. 2021;4(41):103-109. – DOI 10.55287/22275398_2021_4_103. (In Russ)
7. Modeling of the pulsation component of the wind load on the building frame using several calculation methods / G.M. Kravchenko, E.V. Trufanova, I.V. Kondrik, I.A. Khatkhokhu. *Engineering Bulletin of the Don*. 2017;2 (45): 98. (In Russ)
8. Simbirkin V. Analysis of Reinforced Concrete Loadbearing Systems of Multistorey Buildings. Modern Building Materials, Structures and Techniques: CD-ROM Proceedings of the 8th International Conference, Vilnius, May 19-21, 2004: 98-99. (In Russ)
9. Turovsky S.V. Influence of natural vibration modes of a multi-story frame (In Russ)
10. Kravchenko G.M. Rational design of elements of the spatial framework of a building / G.M. Kravchenko, E.V. Trufanova, E.V. Ladnaya. *Engineering Bulletin of the Don*. 2017;1(44):59. (In Russ)
11. Adishchev, V.V. Verification of the numerical-analytical method for determining deflections using numerical modeling / V.V. Adishchev, V.V. Maltsev, M.N. Danilov. *News of higher educational institutions. Construction*. 2017;9 (705):15-24. (In Russ)

Сведения об авторах:

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

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

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

Муртазалиев Гелани Муртазалиевич, доктор технических наук, профессор, кафедра «Сопrotивление материалов, теоретической и строительной механики»; ventav@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

Gelani M. Murtazaliev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department Resistance of Materials, Theoretical and Construction Mechanics; ventav@mail.ru

Конфликт интересов / Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 24.09.2025.

Одобрена после рецензирования/Reviced 17.10.2025.

Принята в печать /Accepted for publication 10.11.2025.