

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 624.011

DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-1-238-244

Оригинальная статья / Original Paper

Пространственные большепролетные конструкции

А.К. Юсупов, Х.М. Муселемов, Р.И. Вишталов

Дагестанский государственный технический университет,
367026 г. Махачкала, пр. И.Шамиля, 70, Россия

Резюме. Цель. В данной статье рассматриваются пространственные большепролетные конструкции, приводятся особенности их работы, а также примеры компоновки. Даются генеральные размеры и способы стабилизации перемещений. **Метод.** Приводятся особенности работы и компоновки пространственных большепролетных конструкций, а также расчётные формулы. Представлены виды сечений и узлы сопряжения элементов. Излагается методика, позволяющая стабилизировать перемещения большепролетных покрытий. **Результат.** Приведенные конструктивные схемы, а также анализ их работы позволяют проектировать большепролетные пространственные системы в виде выпуклых и вогнутых конструкций, которые обладают высокой надёжностью, минимальным весом, а также высокой технологичностью при изготовлении, транспортировке и монтаже. **Вывод.** Предложенные рациональные конструктивные решения позволяют уменьшить собственный вес пространственных выпуклых и вогнутых покрытий, обладающих необходимой жёсткостью, прочностью и устойчивостью. Рассмотренные в статье виды конструктивных схем, сечения и узлы сопряжения элементов находят широкое применение в практике проектирования и строительства.

Ключевые слова: пространственные конструкции, выпуклые и вогнутые конструкции, вантовые и мембранные покрытия, распорные системы, надёжность, узлы, сечения

Для цитирования: А.К. Юсупов, Х.М. Муселемов, Р.И. Вишталов. Пространственные большепролетные конструкции. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50 (1):238-244. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-1-238-244

Spatial large-span structures

A.K. Yusupov, H.M. Muselemov, R.I. Vishtalov

Daghestan State Technical University,
70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia

Abstract. Objective. This article discusses spatial large-span structures, provides features of their work, as well as layout examples. General dimensions and ways of stabilizing displacements are given. **Method.** The features of the work and layout of spatial large-span structures, as well as calculation formulas are given. The types of sections and nodes of conjugation of elements are presented. A technique is described that allows stabilizing the movements of large-span pavements. **Result.** The given structural schemes, as well as the analysis of their work, allow designing large-span spatial systems in the form of convex and concave structures that have high reliability, minimal weight, and high manufacturability in manufacturing, transportation and installation. **Conclusion.** The proposed rational design solutions make it possible to reduce the own weight of spatial convex and concave coatings, which have the necessary rigidity, strength and stability. The types of structural schemes, sections and junctions of elements considered in the article are widely used in the practice of design and construction.

Keywords: spatial structures, convex and concave structures, cable-stayed and membrane coatings, spacer systems, reliability, knots, sections

For citation: A.K. Yusupov, Kh.M. Muselemov, R.I. Vishtalov. Spatial large-span structures. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2023; 50(1): 238-244. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-1-238-244.

Введение. С целью уменьшения пролетного изгибающего момента покрытия большепролетных зданий выполняют выпуклыми вверх или вогнутыми вниз [1,2]. При этом на опорах возникают распоры H , от которых в середине пролета развиваются моменты обратного знака к моментам от внешней нагрузки q [9].

Постановка задачи. На рис. 1 а. дается схема выпуклой конструкции. Конструкция работает на сжатие с изгибом. Поэтому она подвержена к потере устойчивости. Другими словами, в выпуклых конструкциях возникает проблема устойчивости. Для обеспечения устойчивости обычно применяют различные конструктивные приемы: решетчатые сечения арки или рамы, переменность сечения по пролету, увеличения высоты сечения ригеля, применение сталей повышенной прочности или алюминиевых сплавов [6-8] и т.д. Выпуклые конструкции, имея распор H , обладают способностью уменьшать пролетные изгибающие моменты, но при этом возникает проблема потери устойчивости.

На рис. 1 б. показана схема вогнутой конструкции. Здесь висячая конструкция устойчива. Другими словами, здесь нет проблемы устойчивости. Однако есть здесь другая проблема: возникают большие вертикальные перемещения, то есть проблема стабилизации прогибов. Эта проблема решается тремя конструктивными приемами:

1. Предварительное напряжение конструкций;
2. Применение вместо гибких нитей жестких;
3. Придание поверхности вогнутой оболочки двоякой кривизны, особенно поверхности с положительной и отрицательной кривизной.

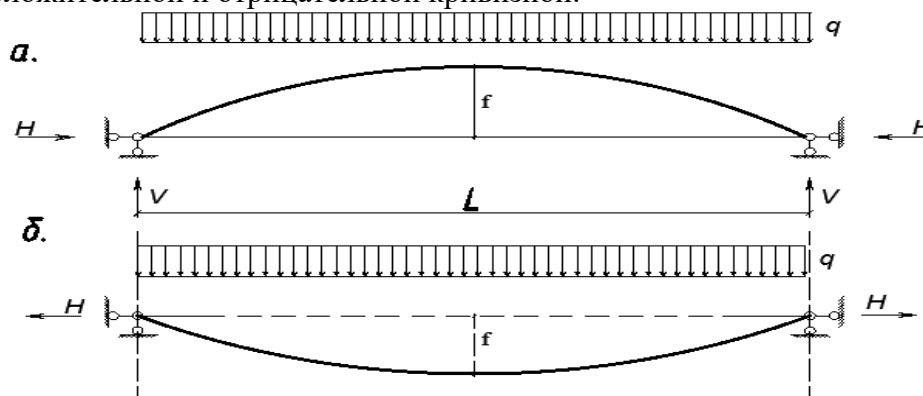


Рис. 1. Расчётные схемы выпуклых и вогнутых конструкций: а-выпуклые арочные конструкции или цилиндрические оболочки; б-вогнутые висячие конструкции или цилиндрические оболочки.

Fig.1. Design schemes for convex and concave structures: a-convex arch structures or cylindrical shells; b-concave hanging structures or cylindrical shells

Из рис.1 а., следует, что изгибающие моменты в середине пролёта

$$M_0 = M_6 - H \cdot f \quad (1)$$

или

$$M_0 = \frac{q \cdot L^2}{8} - H \cdot f. \quad (2)$$

В висячих конструкциях (рисунок-1 б.) $M_0 = 0$. Поэтому из равенства (2) следует $\frac{q \cdot L^2}{8} - H \cdot f = 0$. Отсюда распор

$$H = \frac{q \cdot L^2}{8 \cdot f}. \quad (3)$$

Выпуклые конструкции (арки) рациональны на пролетах 120÷180 м. А вогнутые конструкции рациональны (поскольку они работают на растяжении) на пролетах 120 и выше. Верхний предел пролета здесь ограничивается расчетными сопротивлениями растянутых несущих элементов вогнутого покрытия.

Методы исследования. Перемещения поверхности висячих покрытий, как было указано выше, можно стабилизировать тремя конструктивными приемами: предварительным напряжением висячих элементов; путем применения вместо гибких нитей жестких [3,4]; с помощью придания поверхности кривизны - отрицательной в одном направлении и положительной в другом (седловидные покрытия).

В качестве примера приведем вантовое седловидное покрытие, рис. 2. Здесь даются разрез и план вантового седловидного покрытия (США). На рис. 2 все размеры даны в метрах. Здесь две наклонные арки опираются на вертикальные колонны. Эти арки играют роль опорного контура. На этот контур подвешиваются ванты (канаты). Стабилизация перемещений седловидного покрытия обеспечивается за счет предварительного напряжения вант, идущих поверх несущих вант. На рис. 2 б. ванты, с помощью которых предварительно напрягаются несущие ванты, идут в поперечном направлении. Каждая ванта с помощью домкратов предварительно натягивается, тем самым стабилизируются перемещения покрытия.

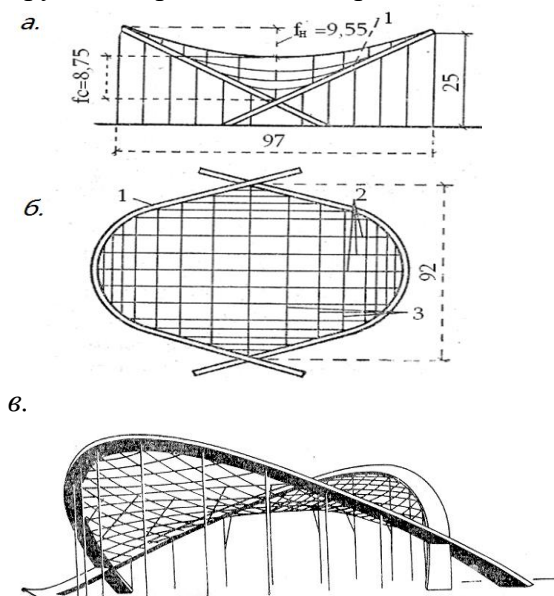


Рис.2. Вантовое седловидное покрытие Рэлей-арена: а-разрез, б-план, в-аксонометрия 1 – железобетонные арки; 2 – несущие тросы диаметром 32мм через 1,83м; 3 – стабилизирующие тросы диаметром 19мм через 1,83м.

Fig.2. Cable-stayed saddle roof of the Rayleigh Arena: a - section, b - plan, c - axonometry 1 - reinforced concrete arches; 2 - carrying cables with a diameter of 32 mm through 1.83; 3-stabilizing cables with a diameter of 19 mm through 1.83 m.

В последнее время находят широкое применение мембранные покрытия [11]. Оболочка перекрытия представляет собой тонкий стальной лист толщиной в 1 мм [5,11]. Стабилизация перемещений здесь обеспечивается путем придания поверхности двойной кривизны. Мембранные покрытия относятся к легким покрытиям [4,5] они, обладая легкостью и архитектурной выразительностью, одновременно обладают большим недостатком: мембраны боятся коррозии, которая вызывает у них нарушение сплошности, то есть пробиваются отверстия (ржавчина легко съедает лист толщиной в 1 мм).

Образование отверстия приводит к концентрации напряжений, которые охрупчивают сталь, поэтому вызывают внезапное нарушение мембранного покрытия. По этой причине необходимо во время эксплуатации постоянно покрывать поверхность мембраны коррозионно-защитными красками. Были случаи обрушения мембранных покрытий из-за появления влаги на поверхности мембраны, которые привели к ржавчине, соответственно

к образованию отверстий и концентрации напряжений (лаборатория в ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко). Приведём пример мембранного покрытия на рис. 3.

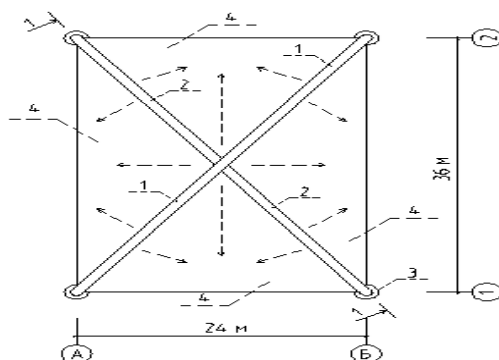


Рис.3. План городошника с мембранным покрытием в стадионе «Динамо»

Fig.3. Plan of a membrane-coated gorodoshnik in the Dynamo stadium

На рис. 3: 1 и 2 – две перекрестные в плане арки трубчатого сечения образуют опорный контур мембранного покрытия; 3 – оголовок (капитель) колонны трубчатого сечения; 4 – висячая оболочка в виде мембраны из металлических листов толщиной в 1 мм; пунктирными стрелками показаны направления стекания воды по поверхности мембранной оболочки, по этим стрелкам можно видеть, как меняется кривизна мембранной оболочки. Именно эта кривизна обеспечивает стабилизацию перемещений покрытия. Все элементы сооружения, кроме фундаментов, из металла; две перекрестные в плане арки и мембрана в целом были скомпонованы и собраны на земле, затем были подняты с помощью гидравлических домкратов и установлены на заранее возведенные четыре колонны. Распор арок воспринимается самой мембраной. «Геометрия» арки представляет собой безмоментный контур при воздействии постоянных нагрузок.

Мембранные висячие оболочки имеют небольшой вес, рациональны в пролетах 20÷60(м).

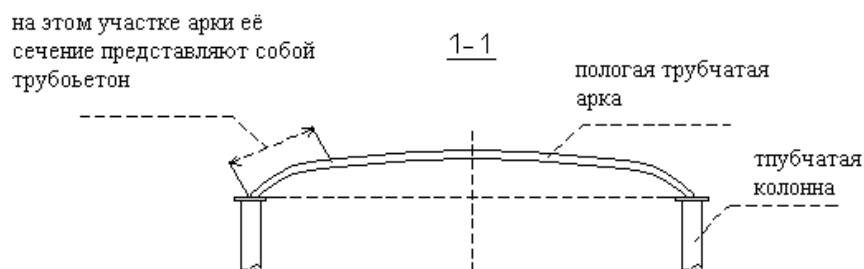


Рис.4. Разрез 1-1, по плану рис.3

Fig.4. Section 1-1, according to the plan of Fi.3

Здесь реализуется принцип лука и тетивы. Роль лука играют арки, а роль тетивы – висячая оболочка – мембрана. Вместо мембраны на перекрестные арки можно подвесить сетки из вант. В этом случае в качестве вант может служить высокопрочная арматура, полосовая сталь, канаты. Поверх вантовой сетки укладываются железобетонные или армоцементные плиты.

На рис. 5 дана аксонометрия городошника с мембранным покрытием. Здесь пунктирными стрелками показаны направления стока воды. Это сооружение было построено на стадионе Динамо в Москве в 1970 году. Стальной висячий лист работает на растяжение и сдвиг в своей плоскости. Жесткость покрытия достигается за счет геометрии поверхности: двоякая кривизна покрытия стабилизирует деформации и обеспечивает естественный водоотвод. Здесь мембрана играет роль тетивы, а арки – лука. Такое натяжение мембраны и двоякая кривизна ее поверхности обеспечивают стабилизацию прогибов покрытия.

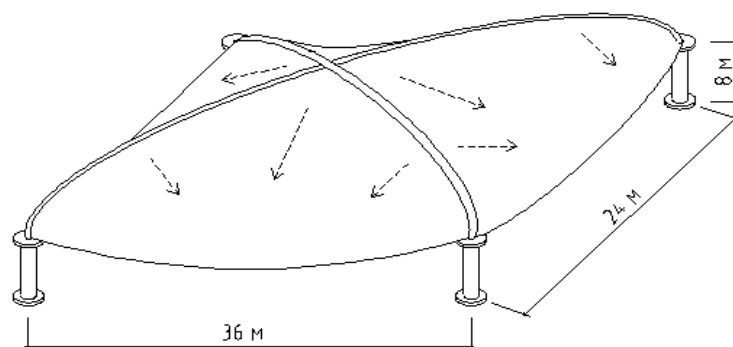


Рис. 5. Аксонометрия городошника с мембранным покрытием в стадионе «Динамо»
Fig. 5. Axonometry of a gorodoshnik with a membrane coating in the Dynamo stadium

Обсуждение результатов. Далее приведем ещё два примера большепролетного покрытия. На рис. 6 даются план и разрез мембранного большепролетного покрытия. Мембранная оболочка лежит на жестких нитях, которые идут с определенной кривизной, образуя тем самым оболочку с двоякой кривизной. Это обеспечивает стабилизацию перемещений мембраны. Направляющие полосы здесь играют роль жестких нитей. На объектах олимпийской деревни в Москве широко применялся этот конструктивный прием: растянутые элементы которые работают на растяжении конструировались в виде жестких нитей.

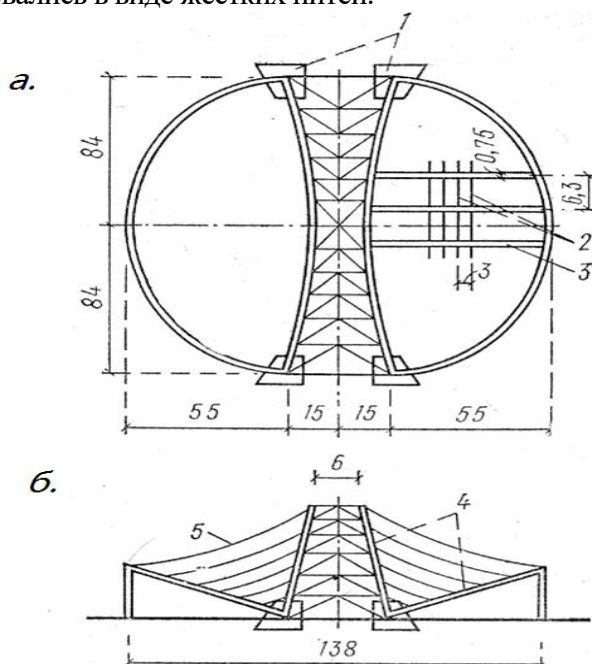


Рис. 6. Велотрек в Крылатском (Москва)

1 – железобетонные опоры; 2– направляющие швеллеры; 3 – направляющие полосы 50x60мм; 4 – металлические арки; 5 – мембрана (t = 4 мм)

Fig. 6. Cycling track in Krylatskoye (Moscow)

1 - reinforced concrete supports; 2 - guide channels; 3 - guide strips 50x60mm; 4 - metal arches; 5 - membrane (t = 4 mm)

Приведём еще один пример [1,12], в котором покажем конструктивный прием предварительного напряжения вантовой сетчатой седловидной оболочки.

Одним из эффективных и технологичных способов преднапряжения несущих и стабилизирующих вант является метод опускания опор.

На рис.7 даётся план вантовой седловидной сетчатой оболочки. Железобетонный контур вантового покрытия опирается на колонны (рис.8). Для наглядности стабилизирующие ванты на левой половине покрытия условно не показаны (рис.7); А, Б, С, Д – опоры (см. план и аксонометрию). Пунктирными линиями показаны стабилизирующие ванты, сплошными – несущие. Стабилизирующие ванты натягивают поверх несущих.

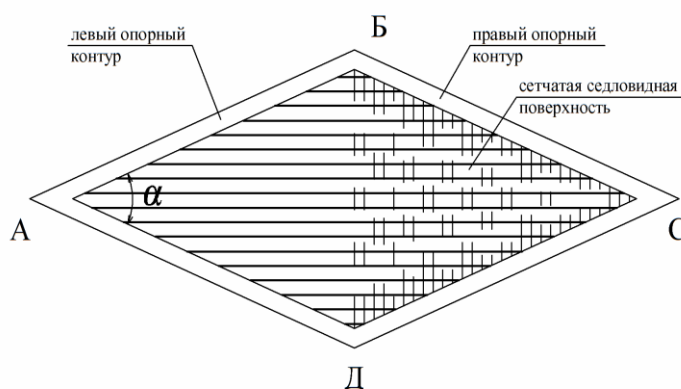


Рис. 7. Схема расположения вант и опорного контура в плане
 Угол α – произвольный, в частном случае $\alpha = 90^\circ$
Fig. 7. Schematic of the location of the stays and the support contour in plan
 Angle α is arbitrary, in a particular case $\alpha = 90^\circ$

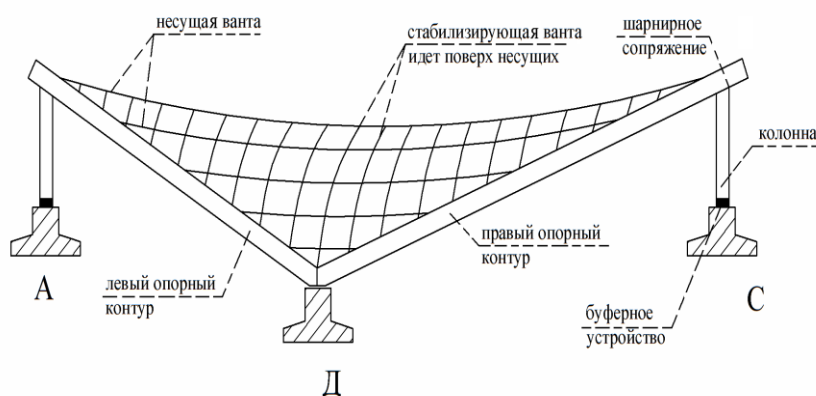


Рис. 8. Аксонометрия седловидной сетчатой поверхности
Fig. 8. Axonometry of a saddle mesh surface

Правый и левый опорные контуры на опорах «Д» и «Б» имеют возможность получать повороты относительно друг друга. Под колонны А и С (на фундаментах) устанавливают регулируемые буферные устройства. После натяжения как несущих, так и стабилизирующих вант, и придания сетчатой седловидной поверхности требуемой «геометрии» с помощью буферных устройств опускают по вертикали колонны «А» и «С». Это приводит к преднапряжению несущих и стабилизирующих вант – к стабилизации деформаций сетчатой поверхности.

После стабилизации деформаций сетчатую поверхность наполняют асбестоцементными или железобетонными плитами. При этом стабилизирующие ванты теряют преднапряжение. До замоноличивания швов (между плитами) следует с помощью буферных устройств дополнительно опустить по вертикали колонны «А» и «С» (см. аксонометрию). Таким образом, можно восстановить потерю преднапряжения в стабилизирующих вантах, после чего необходимо замонолитить швы между плитами покрытия. Этот способ стабилизации покрытия высокотехнологичен и эффективен.

Вывод. В настоящей работе проведены исследования особенностей работы большепролетных покрытий. Сформулированы конструктивные приёмы, которые позволяют стабилизировать перемещения. Дан сравнительный анализ работы, выпуклых и вогнутых большепролетных конструкций. Изложены способы стабилизации больших перемещений висячих покрытий.

Предложенные рациональные конструктивные решения позволяют уменьшить собственный вес пространственных выпуклых и вогнутых покрытий, обладающих необходимой жёсткостью, прочностью и устойчивостью.

Библиографический список:

1. «Металлические конструкции» – под редакцией Ю.И. Кудишина, Москва, Академия, 2008 г.
2. «Металлические конструкции» – под редакцией Е.И. Беленя, Москва, Стройиздат, 1986 г.
3. Беленя Е.Н. Предварительно напряженные несущие металлические конструкции. – 2-е изд. – Москва, Стройиздат, 1975. – 415 с.
4. Металлические конструкции (специальный курс) – 2-е изд. под редакцией Беленя Е.Н., – Москва, Стройиздат, 1976. – 600 с.
5. Брудка Ян, Лубински Мечислав. Легкие стальные конструкции (перевод с польского). – Москва, Стройиздат, 1974.
6. Металлические конструкции: Справочник проектировщика. 2-е изд. Под редакцией Мельникова М.П. – Москва, строй.издат. 1980. – 776с.
7. Справочник конструктора «Стальные конструкции» – под редакцией Шумакова 2004 г.
8. «Основы металлических конструкций» – В.В. Маслов, Волгоград
9. СП 20.13330.2016 Свод правил. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85.
10. СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции». М.: Стандартинформ, 2017. АО "НИЦ "Строительство" – ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, 92 с.
11. Трофимов В.И., Еремеев П.Г. «Мембранные конструкции зданий и сооружений» – Москва, Стройиздат, 1990.
12. Юсупов А.К. «Металлические конструкции в вопросах, в ответах и в проектировании» – Махачкала, Дагестанский государственный технический университет, 2010 г.

References:

1. Metal structures – edited by Yu.I. Kudishina, Moscow, Academy, 2008 (In Russ)
2. Metal structures - edited by E.I. Belenya, Moscow, Stroyizdat, 1986(In Russ)
3. Belenya E.N. Prestressed load-bearing metal structures. – 2nd ed. - Moscow, *Stroyizdat*, 1975; 415 p. (In Russ)
4. Metal structures (special course) - 2nd ed. under the editorship of Belenya E.N., Moscow, *Stroyizdat*, 1976; 600. (In Russ)
5. Brudka Jan, Lubinski Mechislav. Light steel structures (translated from Polish). Moscow, *Stroyizdat*, 1974. (In Russ)
6. Metal structures: A designer's guide. 2nd ed. Under the editorship of Melnikov M.P. - Moscow, stroy.izdat. 1980; 776. (In Russ)
7. Handbook of the designer "Steel structures" - edited by Shumakov 2004 (In Russ)
8. "Fundamentals of metal structures" V.V. Maslov, Volgograd (In Russ)
9. SP 20.13330.2016 Code of Practice. Loads and impacts. Updated edition of SNiP 2.01.07-85. (In Russ)
10. SP 16.13330.2017 "Steel structures". M.: Standartinform, JSC "Research Center "Construction" - TsNIISK named after V.A. Kucherenko, 2017; 92. (In Russ)
11. Trofimov V.I., Eremeev P.G. "Membrane structures of buildings and structures" - Moscow, Stroyizdat, 1990. (In Russ)
12. Yusupov A.K. "Metal structures in questions, in answers and in design" - Makhachkala, Dagestan State Technical University, 2010(In Russ)

Сведения об авторах:

Юсупов Абуспян Курашевич, доктор технических наук, профессор, кафедры «Строительные конструкции и гидротехнические сооружения»; hairulla213@mail.ru

Муселемов Хайрулла Магомедмуратович, кандидат технических наук, доцент, кафедры «Строительные конструкции и гидротехнические сооружения»; hairulla213@mail.ru

Вишталов Раджаб Исабекович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительные конструкции и гидротехнические сооружения»

Information about the authors:

Abusupyan K.Yusupov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Department of Building Structures and Hydraulic Structures; hairulla213@mail.ru

Hairulla M.Muselemov, Cand.Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department of Building Structures and Hydraulic Structures; hairulla213@mail.ru

Rajab I. Vishtalov, Cand.Sci. (Eng.), Assoc. Prof. Department of Building Structures and Hydrotechnical Structures; hairulla213@mail.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 12.01.2023.

Одобрена после рецензирования/ Revised 31.01.2023.

Принята в печать /Accepted for publication 31.01.2023.