

# Строительные конструкции, здания и сооружения Structural units, buildings, structures

Научная статья

УДК 624.014.9

DOI: 10.14529/build240102

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЯТИЯРУСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ В ВИДЕ ГИПЕРБОЛОИДОВ ВРАЩЕНИЯ И ПРОВЕДЕНИЕ ЛАБОРАТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ ПО ИЗУЧЕНИЮ ИЗМЕНЕНИЙ НАГРУЗОК НА УЗЛОВЫЕ КРЕПЛЕНИЯ

*И.Е. Кущев, pgs-rimsou@mail.ru*

*Д.А. Романченко, 89060627113a@gmail.com*

*Рязанский институт (филиал) Московского политехнического университета,  
Рязань, Россия*

**Аннотация.** Статья посвящена изучению опыта эксплуатации конструкций в виде гиперboloидов вращения (типа башня Шухова), выполненных из полимерных конструкций. Проведены лабораторные исследования по моделированию деформаций такого типа конструкций. Лабораторные исследования проведены с целью изучения физических нагрузок на полимерные элементы в зависимости от количества элементов сетчатой оболочки в диаметре яруса гиперboloида вращения, изучения деформации материала, изучения деформации соединений сетчатой оболочки. Данные лабораторного эксперимента дают представление о физических особенностях конструкций в виде гиперboloида вращения, представление о возможных изменениях нагрузок в данных типах конструкций, выполненных из полимерных материалов. Приведены оформленные результаты исследований по изменению нагрузок на узловые крепления в зависимости от количества формирующих ярус элементов, возникающих при этом деформаций в нижних, средних и верхних узловых соединениях элементов яруса. Данная статья имеет научную актуальность, дает представление об изменении нагрузки, деформации, сопротивлении элементов конструкции и иных процессах с целью изучения распределения нагрузок по узловому соединению гиперboloида вращения, совершенствования данных узловых соединений, изучению изменений нагрузок в соединениях в зависимости от количества элементов яруса и их положения, возможности замены металлических элементов на полимерные.

**Ключевые слова:** башня, Шухов, гиперboloид вращения, оболочки, нагрузки, деформация

**Для цитирования.** Кущев И.Е., Романченко Д.А. Моделирование пятиярусных конструкций в виде гиперboloидов вращения и проведение лабораторных испытаний по изучению изменений нагрузок на узловые крепления // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». 2024. Т. 24, № 1. С. 14–19. DOI: 10.14529/build240102

Original article

DOI: 10.14529/build240102

## THE MODELING OF FIVE-TIERED STRUCTURES IN THE FORM OF HYPERBOLOIDS OF ROTATION AND CHANGES IN LOADS ON NODAL FASTENERS

*I.E. Kushchev, pgs-rimsou@mail.ru*

*D.A. Romanchenko, 89060627113a@gmail.com*

*Ryazan Institute (branch) of Moscow Polytechnic University, Ryazan, Russia*

**Abstract.** This article studies hyperboloids of rotation (such as the Shukhov tower) made of polymer structures. Laboratory studies were conducted to model the deformations of this type of structures; to study physical loads on polymer elements, depending on the number of mesh shell elements in the diameter of the hyperboloid rotation tier; and to study the deformation of the material of the mesh shell joints. The data show the physical features of such structures and possible changes in the loads in structures made of polymer materials. The article presents the results of studies on the change of loads on nodal fasteners depending on the number of elements forming the tier and the resulting deformations in the lower, middle, and upper nodal joints of the tier elements. It shows the deformation and the resistance

© Кущев И.Е., Романченко Д.А., 2024.

of structural elements and other processes with changes in loads. It studies the distribution of loads along the nodal connection of the hyperboloid of rotation, improving these nodal connections and studies changes in loads on joints depending on the number of elements of the tier, their position and the possibility of replacing metal elements with polymer ones.

**Keywords:** tower, Shukhov, hyperboloid of rotation, shells, loads, deformation

**For citation.** Kushchev I.E., Romanchenko D.A. The modeling of five-tiered structures in the form of hyperboloids of rotation and changes in loads on nodal fasteners. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*. 2024;24(1):14–19. (in Russ.). DOI: 10.14529/build240102

В 1919 г. В.Г. Шухов создал проект огромной 160-метровой гиперboloидной радиобашни – именно она возвышается сегодня на Шаболовке [1]. Следует отметить, что данный проект был не свойственный для той эпохи, если говорить о габаритах объекта [2].

Башня на Шаболовке состоит из шести ярусов (высота каждого – 25 м). Каждый ярус представляет собой гиперboloид вращения – объемную конструкцию из прямых стальных балок, концы которых скреплены стальными кольцами и заклепками [3].

Первый ярус опирается на бетонный фундамент, диаметр которого 40 м, а глубина 3 м. Башня строилась без использования строительных лесов или подъемных кранов. Возведение происходило следующим образом: каждый следующий ярус собирался внутри башни, а затем с помощью блоков и лебедок поднимался вверх. То есть башня вырастала телескопически [4].

Легендарный проект В.Г. Шухова совсем скоро приобрел огромную популярность, прославился на всю страну, и вскоре после этого сетчатые стальные оболочки в виде гиперboloидов вращения начали массово применяться и по всему миру. За прошедшие 100 лет в мире построено несколько десятков высотных гиперboloидных башен. К ним можно отнести 600-метровую телебашню в Китае [5].

Гиперboloидная конструкция оказалась очень экономичной с точки зрения металлоемкости, но при этом достаточно прочной. А ее ажурность позволяет эффективно противостоять ветровой нагрузке, главному врагу высотных сооружений. Элементы конструкции довольно просты в производстве и строительстве, следовательно, стоимость их невысокая [6].

Конструкция башни состоит из прямых металлических балок и кольцевых опор, которые довольно просты и недороги в изготовлении. Узловые соединения также имеют простую конфигурацию [7].

В частности, использовались упрощенные модели распределения нагрузок, не учитывался ряд характерных особенностей вроде скручивания опорных колец, закрутки балок и продольные деформации. Тем не менее проведенные в последующие десятилетия исследования прочности Шуховской башни, в которых применялись более совершенные и точные методики расчета, показали результаты, близкие к расчетам самого Шухова [8].

### Эксперимент

Моделирование пятиярусных конструкций в виде гиперboloидов вращения и проведение лабораторных испытаний по изучению изменений нагрузок на узловые крепления были выполнены физически на кафедре «Промышленное и гражданское строительство» Рязанского института (филиала) ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет».

Конструкция самого гиперboloида вращения создавалась из полимерных материалов длиной 80 мм, шириной 10 мм. Данный материал имел внутри 13 равноудаленных друг от друга отверстий диаметром 4 мм. Данные полимерные материалы соединялись между собой болтами, гайками и шайбами с двух сторон. Элемент данного соединения изображен на рис. 1.

Для исследования была создана инженерная конструкция, состоящая из гладкой и прямой деревянной основы из фанеры толщиной 10 мм. Площадь конструкции составила 0,85 м<sup>2</sup>.

Далее в данный подиум было вмонтировано деревянное основание для вертикальной металлической опоры. Размер основания составил 50 × 50 мм. Основание было прикреплено к подиуму 4 саморезами длиной 4 × 40 мм. Это дало достаточно прочную основу для конструкции. Одним из вариантов нагружения могло быть отверстие диаметром 6 мм в деревянном основании, через которое проходил металлический стержень диаметром 4 мм, длиной 600 мм, на который подвешивались грузы. Однако в качестве основного вида нагружения использовалась схема с верхним нагружением, когда грузы устанавливались непосредственно на верхнюю распределительно-нагрузочную крышку.

На уровне 450 мм от уровня подиума из двух деревянных брусков путем соединения 4 болтами и гайками был сформирован вспомогательный элемент для фиксации индикаторной головки часового типа. Элемент одной стороной крепился болтами к металлической части прута с помощью стягивания болтов, другая же сторона находилась в свободном, подвешенном горизонтально относительно плоскости подиума уровне. На этой части с помощью болтов была зафиксирована индикаторная головка часового типа (рис. 2), направленная вертикально.

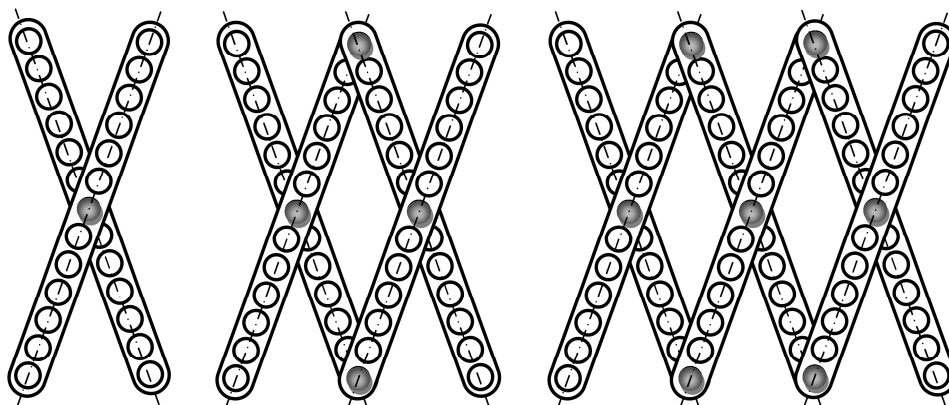


Рис. 1. Элементы для формирования пояса параболической поверхности:  
а – одинарный крест для формирования образующей поверхности; б – двойной крест для формирования образующей поверхности; в – тройной крест для формирования образующей поверхности.  
Серым цветом обозначены места соединений

Индикаторная головка соприкасалась с контрольным винтом, находящимся на верхнем ярусе башни с целью измерения изменения нагрузок гиперboloида в зависимости от экспериментируемого веса.

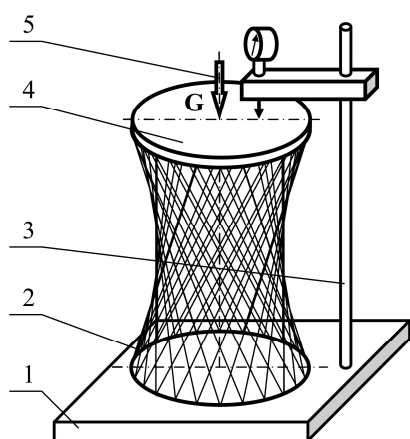


Рис. 2. Общий вид установки для определения деформаций: 1 – станина; 2 – модель пятиступенчатого гиперboloида; 3 – вертикальная стойка с индикаторной головкой; 4 – верхняя распределительно-нагрузочная крышка; 5 – грузы весом  $G$

Для увеличения нагрузки на гиперboloид использовались металлические грузы весом 1 кг (9,80 Н). Располагались они строго перпендикулярно на верхнем ярусе башни. Первоначально располагался 1 груз, фиксировались показания нагрузок на узловых креплениях. Затем к первому грузу добавлялся 2-й груз (2 кг, 19,6 Н), фиксировались показания, затем к двум грузам добавлялся третий (3 кг, 29,4 Н), показания также фиксировались. Также до добавления первого груза фиксировались нулевые показания.

В первом эксперименте мы установили башню с пятью ярусами по 20 полимерных элементов

в каждом ярусе, соединенных болтами. Затем нагрузка была постепенно увеличена с 0 до 3 кг (29,4 Н). Результаты изменения деформации представлены в табл. 1.

Из полученных результатов видно, что при увеличении нагрузки с 1 кг (9,80 Н) до 3 кг (29,4 Н) разница в деформации конструкции в узловых соединениях увеличилась на 0,33 мм.

Деформация пятиступенчатого образца от нагрузки с 20 точками двойного схождения показана на графике (рис. 3).

Во втором эксперименте на станину стенда была установлена пятиступенчатая модель гиперboloида с 22 полимерными элементами в каждом ярусе, с точечным соединением болтами. Нагрузка была осуществлена ступенчатым увеличением с 0 до 3 кг (29,4 Н). Результаты изменения деформации представлены в табл. 2.

Таблица 1  
Деформация пятиступенчатого образца с 20 точками двойного схождения

Показание индикатора	Деформация пятиступенчатого образца от нагрузки, мм			
	0 нагрузка	1 кг (один груз)	2 кг (два груза)	3 кг (три груза)
Начальное	0,60	0,79	0,98	0,12
Текущее		0,19	0,19	0,14
Суммарное		0,19	0,38	0,52

Таблица 2  
Деформация пятиступенчатого образца с 22 точками двойного схождения

Показание индикатора	Деформация пятиступенчатого образца от нагрузки, мм			
	0 нагрузка	1 кг (один груз)	2 кг (два груза)	3 кг (три груза)
Начальное	0,86	0,62	0,34	0,2
Текущее		0,16	0,18	0,32
Суммарное		0,16	0,34	0,66

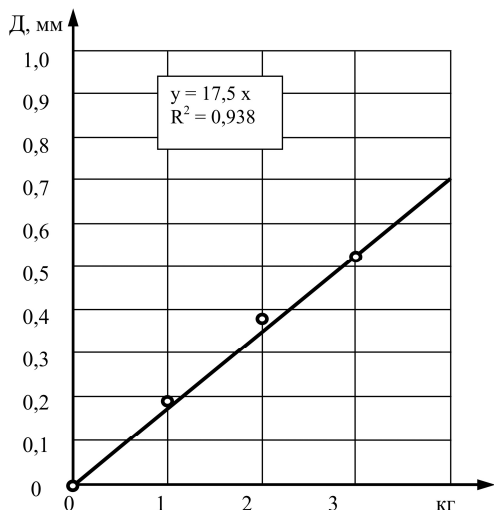


Рис. 3. Деформация пятиступенчатого образца от нагрузки с 20 точками двойного схождения

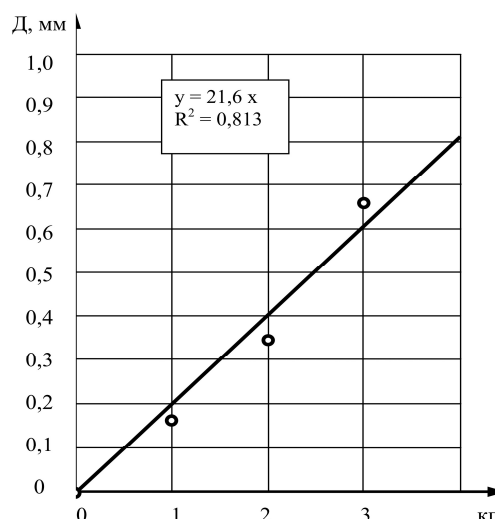


Рис. 4. Деформация пятиступенчатого образца от нагрузки с 22 точками двойного схождения

По результатам исследований видно, что при увеличении нагрузки с 1 кг (9,80 Н) до 3 кг (29,4 Н) разница в деформации увеличилась на 0,50 мм. Такая разница в деформации свидетельствует о снижении жёсткости с увеличением диаметра модели гиперboloида.

Деформация пятиступенчатого образца от нагрузки с 22 точками двойного схождения показана на графике (рис. 4).

В третьем эксперименте на станину был установлен гиперboloид с пятью ярусами по 24 полимерных элемента в каждом ярусе, соединенных болтами. Нагрузка также увеличивалась ступенчато с 0 до 3 кг (29,4 Н). Результаты изменения деформации представлены в табл. 3.

Из табл. 3 и на рис. 5 видно, что при увеличении нагрузки с 1 кг (9,80 Н) до 3 кг (29,4 Н) деформация увеличилась на 0,58 мм. Данные показания в деформации ещё раз подтверждают то, что с увеличением диаметра гиперboloида при постоянной высоте их жёсткость снижается, а деформация увеличивается.

Деформация пятиступенчатого образца от нагрузки с 24 точками двойного схождения показана на графике (рис. 5).

Общие деформации и изменения нагрузки на узловое крепление пятиступенчатых гиперboloидов представлены на рис. 6.

**Выводы**

При проектировании конструкций зданий в виде гиперboloидов вращения в архитектуре используются различные законы математики, физики, сопротивления материалов и строительной механики [9]. Важнейшими из них являются законы Ньютона и Гука. Они тесно связаны с силами, которые опираются на фундаментальные положения указанных наук. Любые формы конструкций

из различных материалов неизбежно подвергаются силовому воздействию [10].

По результатам лабораторных исследований установлено, что с увеличением диаметра яруса

Таблица 3  
Деформация пятиступенчатого образца с 24 точками двойного схождения

Показание индикатора	Деформация пятиступенчатого образца от нагрузки, мм			
	0-я нагрузка	1 кг (один груз)	2 кг (два груза)	3 кг (три груза)
Начальное	0,65	0,95	0,24	0,53
Текущее		0,30	0,29	0,29
Суммарное		0,30	0,59	0,88

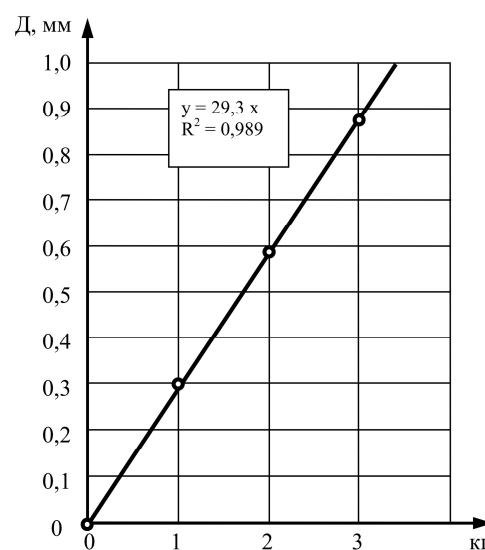


Рис. 5. Деформация пятиступенчатого образца от нагрузки с 24 точками двойного схождения

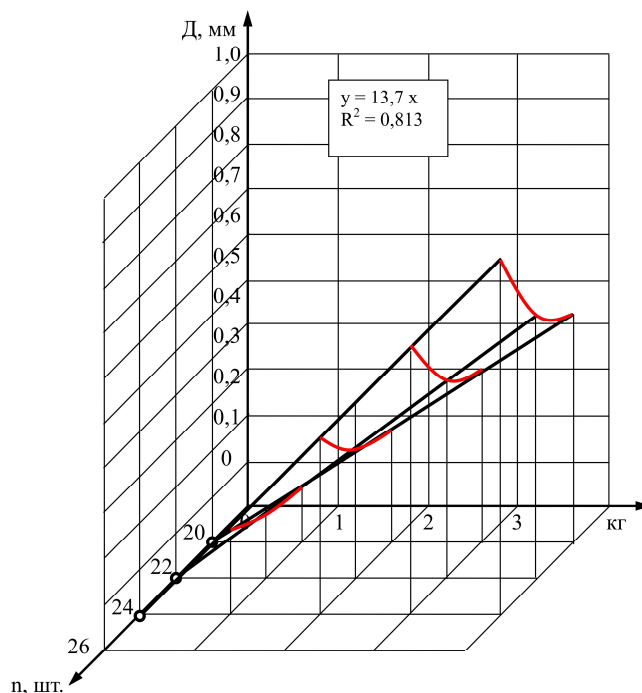


Рис. 6. Общие деформации и изменения нагрузки на узловые крепления пятиступенчатых образцов от нагрузки с 20, 22 и 24 точками двойного схождения

при постоянной высоте гиперboloидов снижается их продольная жесткость. Поперечная сила передается при малых ее значениях непосредственно на болты.

При конструировании следует стремиться к снижению аэродинамического сопротивления сооружения по отношению к господствующим ветрам.

Для высоких сооружений основную опасность несёт ветровая нагрузка, а у решётчатой конструкции она невелика. Эти особенности делают гиперboloидные конструкции прочными, несмотря на невысокую материалоемкость [11].

Такая конструкция является жёсткой: если балки соединить шарнирно, гиперboloидная кон-

струкция всё равно будет сохранять свою форму под действием внешних сил.

Усилия в гиперboloиде могут определяться как в пространственной статически определимой, так и статически неопределимых системах.

Действующими нагрузками в таких гиперboloидах являются собственный вес конструкций, масса технологического оборудования, ветровая нагрузка, обледенение, температурные перепады.

В заключение необходимо отметить, что для повышения продольной жёсткости несущих опор башни необходимо уменьшать диаметр яруса гиперboloида вращения.

#### Список литературы

1. Беликов Г.И. Статика, динамика и устойчивость сетчатых и подкрепленных оболочек с учетом поперечного сдвига. Волгоград: ВолгГАСА, 2003. 298 с.
2. Беликов Г.И. Оптимизация топологии гиперboloида вращения по условиям прочности и жесткости // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура, 2012. № 29(48). С. 110–114.
3. Кривошапко С.Н., Иванов В.Н. Энциклопедия аналитических поверхностей. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2010. 560 с.
4. Гмиряч К.М., Козлов А.В., Проскуров Р.А. Подбор оптимальных параметров эллипсоидной железобетонной оболочки вращения // Международный научно-исследовательский журнал. 2017. № 2(56). С. 100–104. DOI: 10.23670/IRJ.2017.56.049
5. Новожилов В.В. Теория тонких оболочек. Л.: Судостроение, 1962. 432 с.
6. Динамическая устойчивость параболических оболочек в сверхзвуковом газовом потоке / К.В. Аврамов, М.В. Чернобричко, В.Н. Романенко и др. // Прикладная гидромеханика. 2014. Т. 16, № 4. С. 3–10.
7. Чернобричко М.В., Аврамов К.В. Собственные колебания параболических оболочек // Мат. методика физ.-мех. поля. 2014. Т. 57, № 3. С. 78–85.

8. Tambolil N., Kulkarni A.B. Bending Analysis of Paraboloid of Revolution Shell // International Journal of Civil Engineering Research. 2014. Vol. 5, No 4. P. 307–314.
9. Павловский В. Ф., Кондра М. П. Стальные башни: Проектирование и монтаж. Киев: Будівельник, 1979. 200 с.
10. Металлические конструкции: учеб. для вузов по спец. «Пром. и гражд. стр-во» / Е.И. Беленя и др. М.: Стройиздат, 1986. 560 с.
11. Металлические конструкции. Текст учеб. для вузов по специальности «Пром. и гражд. стр-во» / Ю.И. Кудишин и др. М.: Академия, 2007. 112 с.

#### References

1. Belikov G.I. *Statika, dinamika i ustoychivost' setchatykh i podkreplennykh obolochek s uchetom poperechnogo sdviga*. [Statics, dynamics and stability of mesh and reinforced shells taking into account transverse shear]. Volgograd: VolgGASA; 2003. 298 p. (in Russ.)
2. Belikov G.I. Layout optimization of hyperboloid of revolution under stability and rigidity conditions. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering*. 2012;29(48):110–114. (in Russ.)
3. Krivoshepa S.N., Ivanov V.N. *Entsiklopediya analiticheskikh poverkhnostey*. [Encyclopedia of analytical surfaces]. Moscow: Book house “LIBROCOM”; 2010. 560 p. (in Russ.)
4. Gmirach K.M., Kozlov A.V., Proskurov R.A. Selection of optimal parameters of elliptical reinforced concrete shell of revolution. *International Research Journal*. 2017;2(56):100–104. (in Russ.) DOI: 10.23670/IRJ.2017.56.049
5. Novozhilov V.V. *Teoriya tonkikh obolochek* [Theory of thin shells]. Leningrad: Shipbuilding; 1962. 432 p. (in Russ.)
6. Avramov K.V., Chernobrivko M.V., Romanenko V.N., Batutina T.Ya., Pirog V.A. [Dynamic stability of parabolic shells in supersonic gas flow]. *Prikladnaya gidromekhanika* [Applied Hydromechanics]. 2014;16(4):3–10 (in Russ.)
7. Chernobrivko M.V., Avramov K.V. [Proper oscillations of parabolic shells]. *Matematicheskaya metodika fiziko-mekhanicheskogo polya* [Mathematical methodology of the physico-mechanical field]. 2014;57(3):78–85 (in Russ.)
8. Tambolil N., Kulkarni A.B. Bending Analysis of Paraboloid of Revolution Shell. *International Journal of Civil Engineering Research*. 2014;5(4):307–314.
9. Pavlovskiy V.F., Kondra M.P. *Stal'nye bashni: Proektirovanie i montazh* [Steel towers: Design and installation]. Kiev: Budivelnik, 1979. 200 p. (in Russ.)
10. Belenya E.I. et al. *Metallicheskie konstruksii: ucheb. dlya vuzov po spets. "Prom. i grazhd. str-vo"* [Metal structures: studies. for universities on spec. “Prom. and civil society”]. Moscow: Stroyizdat Publ., 1986. 560 p. (in Russ.)
11. Kudishin Yu.I. et al. *Metallicheskie konstruksii. Tekst ucheb. dlya vuzov po spetsial'nosti "Prom. i grazhd. str-vo"* [Metal structures. The text of the studies. for universities specializing in “Prom. and civil society”]. Moscow: Academy Publ., 2007. 112 p. (in Russ.)

#### Информация об авторах:

**Кущев Иван Евгеньевич**, доктор технических наук, профессор кафедры «Промышленное и гражданское строительство», Рязанский институт (филиал) Московского политехнического университета, Рязань, Россия; pgs-rimsou@mail.ru

**Романченко Дмитрий Анатольевич**, магистрант кафедры «Промышленное и гражданское строительство», Рязанский институт (филиал) Московского политехнического университета, Рязань, Россия; 89060627113a@gmail.com

#### Information about the authors:

**Ivan E. Kushchev**, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Industrial and Civil Engineering, Ryazan Institute (branch) of Moscow Polytechnic University, Ryazan, Russia, pgs-rimsou@mail.ru

**Dmitry A. Romanchenko**, Master's student of the Department of Industrial and Civil Engineering, Ryazan Institute (branch) of Moscow Polytechnic University, Ryazan, Russia, 89060627113a@gmail.com

*Статья поступила в редакцию 08.11.2023, принята к публикации 30.11.2023.*

*The article was submitted 08.11.2023; approved after reviewing 30.11.2023.*