

Научная статья
УДК 624.014
<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2024-2/39-52>

Экспериментальные исследования модели вантовой конструкции покрытия

Андрей Владимирович Чесноков✉, Виталий Витальевич Михайлов,
Иван Викторович Долматов

Липецкий государственный технический университет, Липецк, Российская Федерация
✉ andreychess742@mail.ru

Аннотация. Исследование и совершенствование вантовых строительных конструкций, обладающих малым собственным весом и хорошей архитектурной выразительностью, является важной и актуальной задачей. Выполнены экспериментальные исследования нового конструктивного решения вантового покрытия, предназначенного для прямоугольных в плане зданий с редкой сеткой несущих колонн. Апробирована методика возведения вантовой конструкции. Подтверждена работоспособность конструкции при действии симметричных и несимметричных внешних нагрузок. Результаты работы вносят вклад в развитие облегченных строительных конструкций вантового типа, эффективных при возведении зданий гражданского и промышленного назначения на отдаленных и труднодоступных территориях.

Ключевые слова: вантовая конструкция, стальной трос, экспериментальное исследование, лабораторная модель, методика возведения, внешняя нагрузка

Для цитирования: Чесноков А.В., Михайлов В.В., Долматов И.В. Экспериментальные исследования модели вантовой конструкции покрытия // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2024. № 2(59). С. 39–52.

Original article

Experimental studies of the model cable-stayed covering structure

Andrei V. Chesnokov✉, Vitalii V. Mikhailov, Ivan V. Dolmatov

Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russian Federation
✉ andreychess742@mail.ru

Abstract. Research and development of cable building structures is a modern and important task due to low own weight and good architectural appearance. Experimental studies of a novel design solution of a cable roof are performed. The roof is proposed to be used for rectangular buildings with enlarged column spacing. Construction technique for the cable roof is tested. The operability of the structure under the action of symmetrical and asymmetrical external loads is confirmed. The results of the work contribute to the development of light-weight cable structures which are efficient for construction of civil and industrial buildings in remote regions.

Keywords: cable structure, steel cable, experimental research, laboratory model, construction technique, external load

For citation: Chesnokov A.V., Mikhailov V.V., Dolmatov I.V. Experimental studies of the model cable-stayed covering structure. *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2024, no. 2(59), pp. 39–52. (In Russ.).

Введение

Конструкции покрытия зданий и сооружений, применяемые в настоящее время, обладают повышенной материалоемкостью вследствие неравномерного распределения напряжений в поперечном сечении основных несущих элементов, работающих на сжатие с изгибом.

Таким образом, разработка новых конструктивных решений, в которых преобладающую долю займут растянутые элементы, является перспективным научным направлением, способствующим решению следующих задач строительной отрасли: снижение трудоемкости монтажа и применение монтажной техники малой грузоподъемности, строительство на отдаленных и труднодоступных территориях, возведение зданий и сооружений, обеспечивающих свободную планировку внутреннего пространства, развитие промышленного и сельскохозяйственного строительства.

Строительные конструкции, основными несущими элементами которых являются высокопрочные гибкие ванты, имеют малый собственный вес и обладают хорошей архитектурной выразительностью. Они относятся к так называемым tensegrity-системам, в которых непрерывные растянутые пояса объединены отдельными относительно короткими распорками [1, 2].

Tensegrity-системы обладают сложной конструкцией [3], затрудняющей техническое обслуживание и выявление поврежденных элементов на ранней стадии. На основе результатов обследования технического состояния вантового покрытия стадиона делается вывод о существенном снижении несущей способности конструкции, эксплуатируемой длительный период [4]. Подчеркивается важность применения автоматизированных систем мониторинга технического состояния строительных конструкций [5]. Это требует обеспечения надлежащего доступа к основным структурным элементам покрытия за счет упрощения конструктивных решений.

Предложен анализ областей эффективного применения вантовых покрытий [6]. Среди проблем реализации вантовых конструкций выделяется значительная габаритная высота покрытия, трудности с удалением атмосферных осадков с поверхности, повышенная деформативность и распор, передаваемый напряженными вантами на опорный контур.

Для обеспечения совместной работы вантового покрытия и снижения «клавишного эффекта», проявляющегося при действии сосредоточенных нагрузок, получили распространение пространственные конструкции, среди которых выделяются тросовые купола [7]. Положительный эффект от перехода к пространственной структуре покрытия подтвержден выполнением конечно-элементного анализа купола и проведением натурного эксперимента лабораторной модели [8].

Применение тросовых куполов способствует уменьшению габаритной высоты конструкций покрытия и, как следствие, к сокращению неэксплуатируемых объемов здания. Результаты исследования работы под нагрузкой и методика назначения основных параметров тросового купола приведены в работах [9, 10].

Тросовые купола, предназначенные для зданий на круглом или эллиптическом плане, оказываются мало применимыми для прямоугольных зданий и сооружений. Вместе с тем прямоугольная форма является более предпочтительной с эксплуатационной точки зрения, а полноценное развитие вантовых систем возможно лишь при занятии ниши промышленного строительства, где многопролетные здания каркасного типа являются наиболее распространенным проектным решением.

Для прямоугольных в плане зданий с редкой сеткой колонн предложены новые конструктивные решения вантового покрытия (рис. 1). Данные решения защищены патентом на изобретение № 2567588 и патентом на полезную модель № 169612. Предложенное покрытие по сравнению с аналогичными конструкциями обладает меньшей габаритной высотой за счет двухъярусного расположения несущих вант и упрощенной конструкцией, так как вантовые пояса образуют плоские ребра, а не пространственные структуры. Его применение позволяет обеспечить требуемую кривизну поверхности кровли, благоприятствуя реализации легких ограждающих конструкций в виде мягких тентовых оболочек [11].

Обеспечение растягивающих усилий в вантовых элементах достигается предварительным напряжением, которое создается путем натяжения несущих вант поперечного направления (элементы 1 на рис. 1), количество которых в конструкции покрытия незначительно (превышает число рядовых секций на единицу).

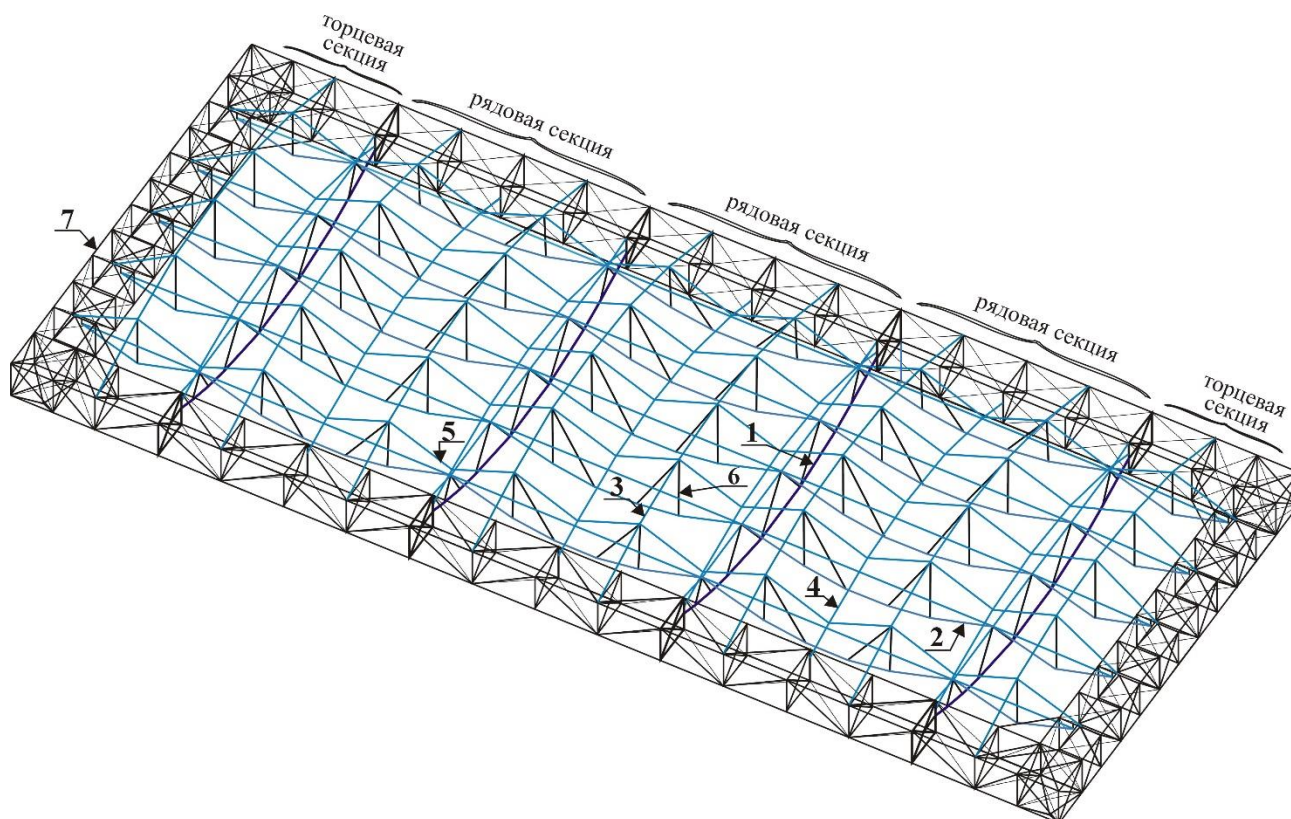


Рис. 1. Вантовая конструкция с двухъярусным расположением несущих вант:

- 1 – несущая ванта поперечного направления; 2 – несущая ванта продольного направления;
3 – стабилизирующая ванта; 4 – связи по верхнему поясу поперечного направления;
5 – связи по верхнему поясу продольного направления; 6 – распорка; 7 – опорный контур**

Fig. 1. Cable-stayed structure with a two-tier arrangement of the bearing cables: 1 – transverse bearing cable; 2 – longitudinal bearing cable; 3 – restraining cable; 4 – top chord transverse link; 5 – top chord longitudinal link; 6 – strut; 7 – support contour

Исследуемая конструкция требует выполнения экспериментальных исследований, подтверждающих ее практическую осуществимость и работоспособность под влиянием внешних воздействий. Так, в работе [12] приводятся экспериментальные результаты, обосновывающие целесообразность применения мембранного покрытия в зданиях, оборудованных подвесными кранами. Полученные по результатам испытаний модели вантовой фермы перемещения, усилия в элементах и частотные характеристики подтвердили возможность практического применения нового конструктивного решения [13]. В работе [14] выполнено экспериментальное исследование влияния основных параметров большепролетных арочных конструкций на обеспечение устойчивости под нагрузкой.

Оценка правильности принятой расчетной схемы и соответствия действительной работы результатам численного моделирования также является важной задачей при разработке новых конструкций зданий и сооружений [15]. Правомерность принятых теоретических предпосылок и допущений подтверждена посредством сопоставления результатов конечно-элементного анализа вантово-стержневой конструкции покрытия с результатами экспериментального исследования лабораторной модели [16].

В работе [17] делается вывод, что экспериментальная модель является полноценным реальным сооружением, которое, несмотря на уменьшенные размеры, работает подобно большепролетной конструкции. Таким образом, экспериментальные исследования позволяют получить достоверную информацию о работе конструкции на стадии эксплуатации.

Из приведенного литературного обзора следует вывод о том, что совершенствование и дальнейшее развитие вантовых строительных конструкций является актуальной задачей. Экспериментальные исследования, несмотря на развитие компьютерной техники и численных методов расчета, сохраняют свою востребованность при разработке новых конструктивных решений, к числу которых принадлежит предложенная вантовая конструкция покрытия.

Целями работы являются:

- оценка работоспособности вантовой конструкции на стадии возведения и последующей эксплуатации;
- апробация методики возведения вантовой конструкции;
- исследование работы вантовой конструкции под действием равномерных и неравномерных внешних нагрузок.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- выполнено экспериментальное определение прочностных и жесткостных характеристик основных вантовых элементов лабораторной модели;
- выполнено конструирование узловых соединений элементов модели, а также замкнутого опорного контура;
- выполнена сборка (монтаж) модели из отдельных укрупненных элементов;
- произведена установка контрольно-измерительной аппаратуры;
- выполнены испытания модели на действие предварительного напряжения и внешних нагрузок;
- произведено сопоставление результатов испытаний с результатами статического анализа в программном комплексе MAV.Structure.

Материалы и методы

Выполнены экспериментальные исследования лабораторной модели одной рядовой секции вантовой конструкции с двухъярусным расположением несущих вант. Модель изготовлена в масштабе 1:4 предполагаемой реальной конструкции. Приняты следующие геометрические параметры лабораторной модели (рис. 2):

- пролет $L = 3300$ мм;
- общая ширина $B = 4440$ мм;
- ширина рядовой секции $S_u = 3000$ мм;
- ширина торцевой секции $S_b = 720$ мм;
- расстояние между стабилизирующими вантами поперечного направления, образующими выпуклые вверх ребра, составляет $B_u = 1500$ мм;
- шаг несущих вант продольного направления $L_u = 750$ мм и ширина продольных ячеек покрытия $L_b = 900$ мм;
- стрела несущей ванты поперечного направления составляет $f_1 = 300$ мм, стрела несущей ванты продольного направления $f_2 = 250$ мм, стрела стабилизирующей ванты $f_3 = 300$ мм, стрела вантовой связи по верхнему поясу поперечного направления $f_4 = 175$ мм;
- вертикальное расстояние между опорами несущих вант поперечного и продольного направлений принято равным $h_1 = 45$ мм.

Пролет несущей ванты поперечного направления составляет $L_1 = L$, а отношение стрелы к пролету $k_1 = f_1 / L = 1/11$. Для несущей ванты продольного направления пролет совпадает с шириной рядовой секции $L_2 = S_u$, а отношение стрелы к пролету $k_2 = f_2 / S_u = 1/12$. Для стабилизирующей ванты пролет совпадает с пролетом модели $L_3 = L$, а отношение стрелы к пролету составляет $k_3 = f_3 / L = 1/11$. Для вантовой связи по верхнему поясу поперечного направления пролет равен $L_4 = L - 2 \cdot l_t = 3010$, где $l_t = 145$ мм – ширина опорного контура.

Отношение стрелы к пролету $k_4 = f_4 / L_4 \approx 1/17$. Таким образом, отношения стрел вант к их пролетам, k_i , соответствуют рекомендуемому диапазону $1/24...1/8$ [18]. Предварительное напряжение модели выполнено при помощи талрепов (рис. 2).

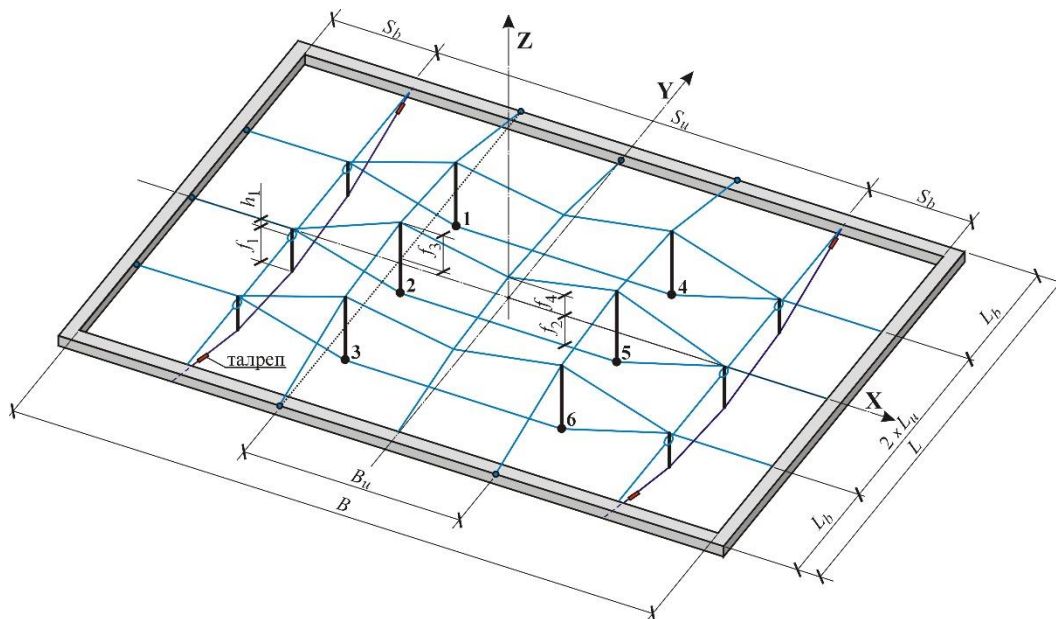


Рис. 2. Геометрическая схема лабораторной модели вантовой конструкции. Показана нумерация узлов нижнего пояса

Fig. 2. Diagram of the cable structure laboratory model. Node numbering for the bottom chord is shown

В качестве основных несущих элементов лабораторной модели применены стальные тросы диаметром 2, 3 и 4 мм, выполненные из высокопрочной проволоки. Распорки между тросами изготовлены из труб ПВХ диаметром 25 мм. Прочностные и жесткостные характеристики стальных тросов определены экспериментально при помощи испытательной машины Р-10, инв. № 549 (рис. 3), с ценой деления шкалы – 0,04 кН. Испытательная машина соответствует ГОСТ 7855.

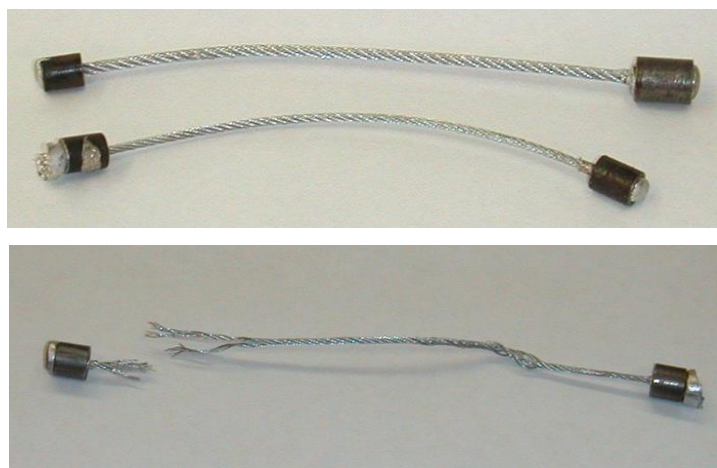


Рис. 3. Определение прочностных и жесткостных характеристик стальных тросов на испытательной машине Р-10: общий вид испытательной машины и образцы троса

Fig. 3. Determination of the strength and stiffness properties of steel cables by the R-10 testing machine: general view of the testing machine and cable samples

Статистическая обработка результатов выполнена в соответствии с предположением того, что разброс экспериментальных данных обусловлен случайными отклонениями, распределенными по нормальному закону [19]:

– вычисление несмещенной оценки истинного значения полученной в эксперименте величины x_i :

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N}, \tag{1}$$

где N – число испытаний (объем экспериментальных данных);

расчет исправленной выборочной дисперсии D_b' и исправленного средне-квадратического отклонения S :

$$D_b' = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}, \tag{2}$$

$$S = \sqrt{D_b'}; \tag{3}$$

– определение границ доверительного интервала:

$$x \in [x_l \dots x_r], \tag{4}$$

где

$$x_{l/r} = \bar{x} \pm \delta_x, \tag{5}$$

где

$$\delta_x = \frac{t_\gamma \cdot S}{\sqrt{N}}, \tag{6}$$

где t_γ – коэффициент Стьюдента при принятой надежности $\gamma = 0.95$ и объеме экспериментальных данных N .

Разрывные усилия определены испытанием 10 тросов каждого диаметра (2, 3 и 4 мм). Таким образом, $N = 10$, а коэффициент Стьюдента равен: $t_\gamma = 2.26$. Разрывные усилия испытываемых тросов находятся в следующих доверительных интервалах: $N_{\text{lim}}^{(2)} = 2.04 \pm 0.05$ кН, $N_{\text{lim}}^{(3)} = 5.06 \pm 0.05$ кН и $N_{\text{lim}}^{(4)} = 9.01 \pm 0.11$ кН, где верхний индекс обозначает диаметр троса в миллиметрах.

Определение продольной жесткости тросовых элементов произведено по формуле:

$$EA = \Delta P \cdot \frac{L_0}{\Delta L}, \tag{7}$$

где ΔP – приращение усилия в испытуемом образце;

L_0 – начальная длина образца;

ΔL – удлинение образца под нагрузкой.

Число образцов – $N = 10$ диаметром 2, 3 и 4 мм. Номинальная начальная длина образца $L_0 = 0.3$ м. Нагружение образца и контроль величины продольного усилия выполнены на испытательной машине Р-10. Измерение удлинений тросовых элементов произведено прогибомерами Н.Н. Аистова с ценой деления 0,01 мм.

С целью снятия свивочных напряжений в проволоках и выборки остаточных деформаций, заготовки тросовых элементов, из которых изготовлены образцы, прошли предварительную вытяжку. Вытяжка произведена пятью циклами загрузки образца до усилия в 20–40% от разрывного, с последующей разгрузкой.

Загрузка образцов на испытательной машине Р-10 при определении их продольной жесткости произведена до 75% от разрывного усилия, так как при превышении данного порога начинают проявляться нелинейно-упругие и пластические свойства материала.

Продольные жесткости испытуемых тросов находятся в следующих доверительных интервалах: $EA^{(2)} = 126.0 \pm 2.55$ кН, $EA^{(3)} = 338.9 \pm 4.58$ кН и $EA^{(4)} = 732.7 \pm 6.49$ кН, где верхний индекс обозначает диаметр троса в миллиметрах. При площадях сечений проволок, составляющих тросы, равных $7.40 \cdot 10^{-3}$ см², $2.06 \cdot 10^{-2}$ см² и $4.60 \cdot 10^{-2}$ см², получены следующие усредненные модули упругости испытуемых тросов: $E^{(2)} = 1.70 \cdot 10^4$ кН/см², $E^{(3)} = 1.65 \cdot 10^4$ кН/см² и $E^{(4)} = 1.59 \cdot 10^4$ кН/см².

Общий вид экспериментальной лабораторной модели приведен на рис. 4. С целью ликвидации люфтов в узловых соединениях рекомендуется выполнить временное нагружение модели до проведения испытаний [20]. Временное нагружение осуществлено как основными натяжными приспособлениями (талрепами), установленными на несущих вантах, так и вспомогательными устройствами, включенными в связевые элементы. Испытание модели внешней нагрузкой произведено подвешиванием грузов к нижним концам стоек (рис. 5).



Рис. 4. Общий вид лабораторной модели вантовой конструкции

Fig. 4. General view of the laboratory model of the cable structure



Рис. 5. Испытание модели вантовой конструкции

Fig. 5. Testing the cable structure model

Рассмотрено нагружение всего покрытия, а также воздействия на половине перекрываемой площади:

- нагрузка $L_{d,0}$: приложение грузов ступенями по $\Delta P_1 = 0.04$ кН в узлы 1...6 нижнего пояса (нумерация узлов – см. рис. 2);
- нагрузка $L_{d,y}$: приложение грузов ступенями по ΔP_1 в узлы 1...3 нижнего пояса, при этом узлы 4...6 остаются незагруженными;
- нагрузка $L_{d,x}$: приложение грузов ступенями по ΔP_1 в узлы 1 и 4 нижнего пояса, а также грузов $\Delta P_2 = 0.02$ кН в узлы 2 и 5 (узлы 3 и 6 остаются незагруженными).

Для каждой нагрузки выполнено пять ступеней нагружения. На каждой ступени производится подвешивание дополнительных грузов по ΔP_1 и ΔP_2 .

Результаты

Монтаж модели, апробация методики осуществления которого является одной из целей работы, выполнен в следующем порядке (рис. 6):

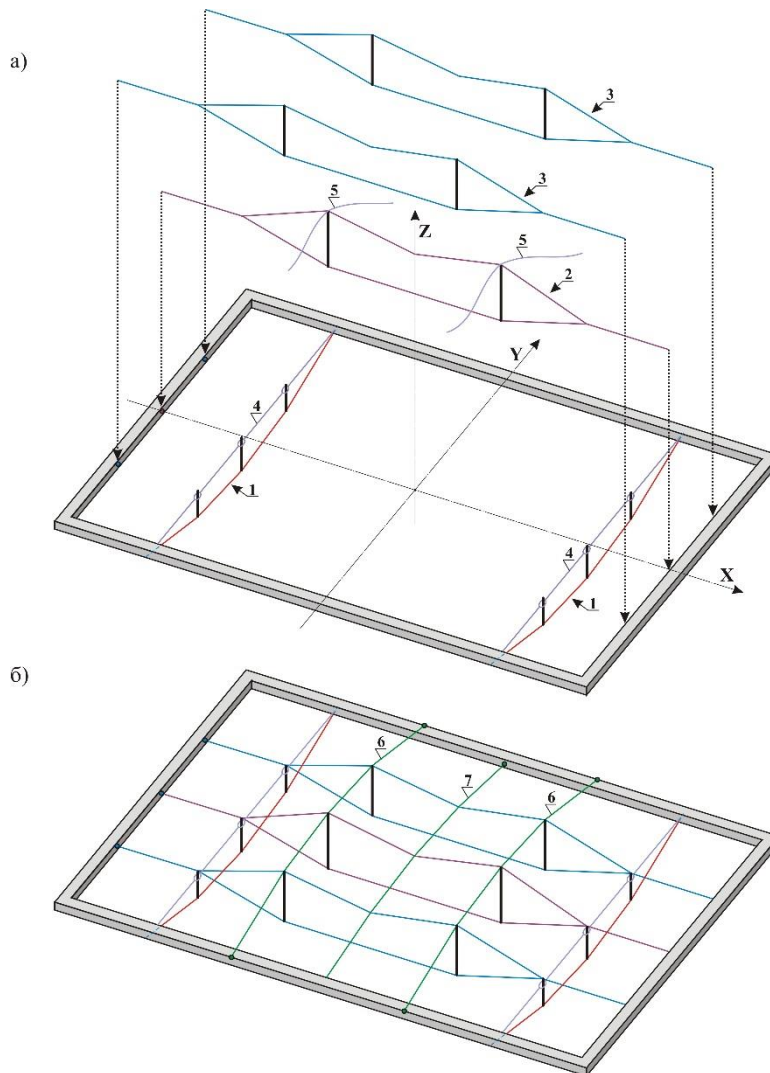


Рис. 6. Монтаж модели (принципиальная схема):

- а) навешивание основных укрупненных элементов модели; б) монтаж вантовых элементов верхнего пояса; 1 – укрупненный элемент несущей ванты поперечного направления; 2, 3 – укрупненные элементы несущих вант продольного направления: центральный и боковые элементы соответственно; 4 – горизонтальная связь постоянная; 5 – монтажная оттяжка; 6 – стабилизирующая ванта; 7 – связь по верхнему поясу поперечного направления постоянная**

Fig. 6. Schematic diagram of the model installation process:

- a) hanging the main combined elements of the model; б) installation of the cable elements of the top chord; 1 – combined element of the transverse bearing cable; 2, 3 – combined elements of longitudinal bearing cables: the central and side elements, respectively; 4 – horizontal permanent tie; 5 – auxiliary tie; 6 – restraining cable; 7 – permanent transverse link of the top chord

- навешивание укрупненных элементов 1, состоящих из несущих вант поперечного направления и стоек;
- стойки, заранее объединенные с вантами, устанавливаются вертикально и фиксируются горизонтальными связями 4;
- навешивание укрупненных элементов несущих вант продольного направления (сначала центральный элемент 2, затем – боковые элементы 3);

- в вертикальном положении укрупненные элементы фиксируются монтажными оттяжками 5;
- замена монтажных оттяжек стабилизирующими вантами 6;
- установка постоянной связи по верхнему поясу поперечного направления 7;
- создание предварительных напряжений в конструкции натяжением несущих вант поперечного направления.

Собранная и напряженная модель обладает геометрической неизменяемостью и сохраняет заданное равновесное положение в пространстве (рис. 7).



Рис. 7. Монтаж модели (фотоиллюстрации):

- а) навешивание укрупненных элементов несущих вант поперечного направления;**
- б) навешивание центрального укрупненного элемента несущей ванты продольного направления**

Fig. 7. Installation of the model (photo illustration):

- a) hanging the combined elements of the transverse bearing cables;
- б) hanging the central combined element of the longitudinal bearing cable

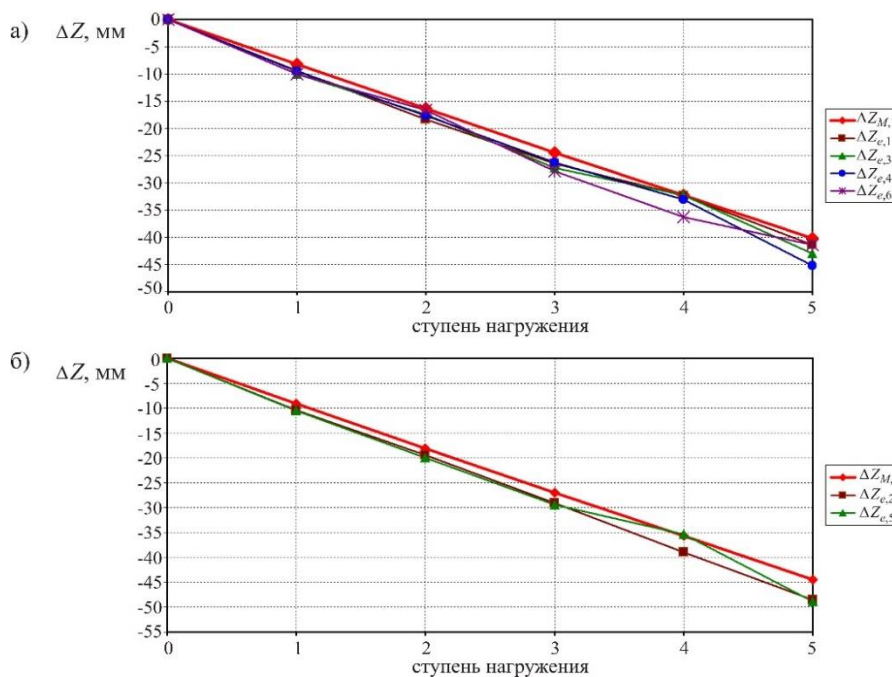


Рис. 8. Вертикальные перемещения узлов вантовой конструкции под действием нагрузки $L_{d,0}$ (загружение всей площади покрытия):

- а) узлы 1, 3, 4 и 6; б) узлы 2 и 5**

Fig. 8. Vertical displacements of the cable structure by the load $L_{d,0}$ (load is on the entire roof area): a) nodes 1, 3, 4 and 6; б) nodes 2 and 5

Сравнение деформативности экспериментальной модели вантовой конструкции и результатов, полученных при помощи программного комплекса нелинейного статического анализа MAV.Structure, приведено на рис. 8–10. На рисунках индексы 1...6 обозначают номера узлов конструкции (см. рис. 2).

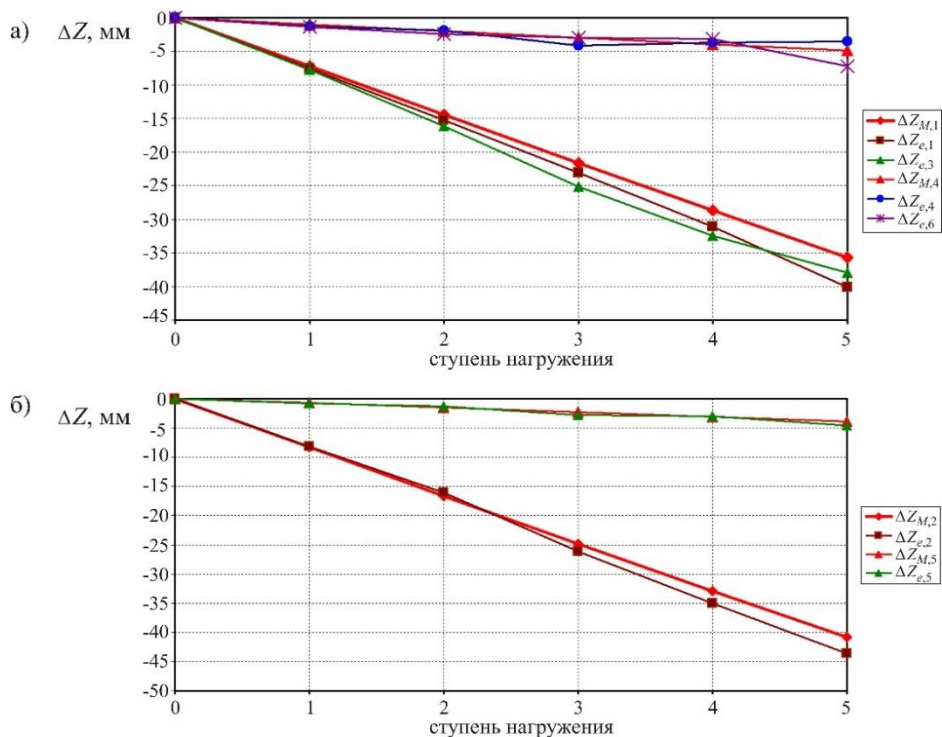


Рис. 9. Вертикальные перемещения узлов вантовой конструкции под действием нагрузки $L_{d,y}$ (загружение половины площади относительно оси Y): а) узлы 1, 3, 4 и 6; б) узлы 2 и 5

Fig. 9. Vertical displacements of the cable structure by the load $L_{d,y}$ (the load is on a half of the roof area relative to the Y-axis): a) nodes 1, 3, 4 and 6; б) nodes 2 and 5

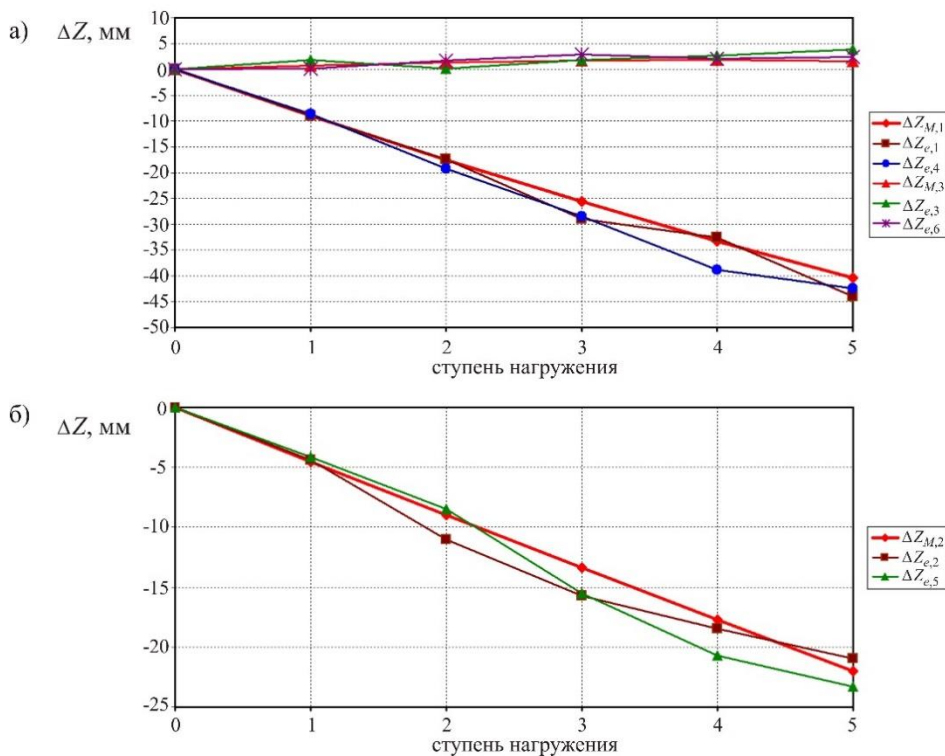


Рис. 10. Вертикальные перемещения узлов вантовой конструкции под действием нагрузки $L_{d,x}$ (загружение половины площади относительно оси X): а) узлы 1, 3, 4 и 6; б) узлы 2 и 5

Fig. 10. Vertical displacements of the cable structure by the load $L_{d,x}$ (the load is on a half of the roof area relative to the X-axis): a) nodes 1, 3, 4 and 6; б) nodes 2 and 5

Перемещения с индексом 'e' получены по результатам эксперимента, в то время как индекс 'M' означает результаты, полученные при помощи программного комплекса MAV.Structure:

$$\Delta Z_{e,j} = \Pi_0 - \Pi_i, \quad (8)$$

$$\Delta Z_{M,j} = \Delta y_{M,i} - \Delta y_{M,0}, \quad (9)$$

где $\Delta Z_{e,j}$ и $\Delta Z_{M,j}$ – вертикальные перемещения узла j конструкции относительно предварительно напряженного состояния;

Π_i – показания прогибомера Н.Н. Аистова (цена деления 0.01 мм);

$\Delta y_{M,i}$ – вертикальное перемещение узла конструкции от совместного действия предварительного напряжения и внешней нагрузки;

i – номер ступени нагружения;

Π_0 и $\Delta y_{M,0}$ – начальное показание прогибомера и вертикальное перемещение узла конструкции, вызванное предварительным напряжением, соответственно.

Обсуждение результатов

Выполнена апробация методики возведения комбинированной конструкции, включающей последовательное навешивание заранее подготовленных укрупненных элементов. В процессе монтажа конструкция требует применения ограниченного количества временных (монтажных) связей, устанавливаемых только в вертикальных плоскостях ребер поперечного направления.

Подтверждена практическая осуществимость создания предварительных напряжений в конструкции в целом за счет натяжения несущих вант поперечного направления.

Экспериментальные перемещения узлов конструкции близко согласуются с расчетными перемещениями, полученными в программном комплексе MAV.Structure, что свидетельствует о правильности выбранной расчетной схемы.

Наибольшие вертикальные перемещения исследуемой конструкции имеют место при воздействии нагрузки $L_{d,0}$ (загрузка всей площади покрытия). Загрузка половины перекрываемой площади вызывает наибольшие неравномерные деформации: в загруженной зоне перемещения узлов достигают 90% от перемещений, вызванных равномерной нагрузкой, в то время как в незагруженной зоне перемещения узлов близки к нулю (от нагрузки $L_{d,y}$). При действии нагрузки $L_{d,x}$ перемещения узлов в незагруженной зоне меняют знак (узлы перемещаются вверх).

Несмотря на неблагоприятный эффект нагрузок, действующих на половине перекрываемой площади, ребра исследуемой конструкции, образованные вантами и стойками, сохраняют вертикальное положение в пространстве.

Заключение

Выполненные экспериментальные исследования подтверждают работоспособность предложенного нового конструктивного решения вантового покрытия на стадии возведения и последующей эксплуатации в условиях действия равномерных и неравномерных внешних нагрузок.

Область применения предложенной конструкции – большепролетные гражданские и промышленные здания со свободной планировкой внутреннего пространства, включающие спортивные и торговые комплексы, объекты транспортной инфраструктуры, производственные цеха и складские сооружения. Вследствие малого собственного веса и отсутствия необходимости использования монтажной техники большой грузоподъемности применение исследуемой конструкции будет способствовать развитию отдаленных и труднодоступных территорий с недостаточно развитой инфраструктурой.

Дальнейшее направление исследований предлагает натурные испытания многосекционной и многопролетной вантовой конструкции.

ВКЛАД АВТОРОВ | CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

The authors contributed equally to this article.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ | CONFLICT OF INTEREST

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflict of interest.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Еремеев П.Г. Вантовая комбинированная конструктивная система «Тенсегрити» // Промышленное и гражданское строительство. 2021. № 1. С. 21–27. EDN: XVAVUG
2. Habibi T., Rhode-Barbarigos L., Keller T. Effects of prestress implementation on self-stress state in large-scale tensegrity structure // Engineering Structures. 2023. Vol. 288. Art. 116222. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116222>
3. Snelson K. The art of tensegrity // International Journal of Space Structures. 2012. Vol. 27, № 2-3. P. 71–80. <https://doi.org/10.1260/0266-3511.27.2-3.71>
4. Kmet S., Tomko M., Soltys R., Rovnak M., Demjan I. Complex failure analysis of a cable-roofed stadium structure based on diagnostics and tests // Engineering Failure Analysis. 2019. Vol. 103. P. 443–461. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.04.051>
5. Фарфель М.И., Гукова М.И., Кондратов Д.Ю., Конышин Д.Ю. Апробированная методика проведения мониторинга в зданиях и сооружениях // Вестник НИЦ. Строительство. 2021. № 1(28). С. 110–123. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-1\(28\)-110-123](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-1(28)-110-123)
6. Еремеев П.Г. Висячие конструкции // Строительные материалы. 2022. № 10. С. 62–67. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-807-10-62-67>
7. Yu X., Yaozhi L., Yafeng W., Xian X., Hua-Ping W., Yanbin S., Wenwei F. A new configuration of Geiger-type cable domes with sliding ridge cables. Computational framework and structural feasibility investigation // Engineering Structures. 2023. Vol. 286. Art. 116028. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116028>
8. Zhang A., Shangguan G., Zhang Y., Zou M., Luo C. Structural behavior of a fully assembled cable-piercing ridge-tube cable dome with modular assembly ring truss // Journal of Constructional Steel Research. 2023. Vol. 211. Art. 108193. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2023.108193>
9. Sudarshan K. Structural design and behavior of prestressed cable domes // Engineering Structures. 2020. Vol. 209. Art. 110294. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110294>
10. Xiangyu Y., Yan Y., Zhihua C., Qing M. Mechanical properties of a hybrid cable dome under non-uniform snow distribution // Journal of Constructional Steel Research. 2019. Vol. 153. P. 519–532. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.10.022>
11. Mikhailov V.V., Chesnokov A.V. Cable roof structure with flexible fabric covering // Proceedings of the VIII international conference on textile composites and inflatable structures. Munich, Germany, 2017. P. 436–447. URL: <http://congress.cimne.com/membranes2017/frontal/Doc/Ebook2017.pdf> (дата обращения: 25.01.2024).
12. Еремеев П.Г., Туснин А.Р. Экспериментальные исследования модели мембранного покрытия производственного здания // Строительная механика и расчет сооружений. 1992. № 1. С. 65–70. EDN: XMCZIL
13. Zheng Y., Li S., Xu X. Experimental study on a novel cable-strut truss // Engineering Structures. 2022. Vol. 265. Art. 114491. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114491>
14. Кашеварова Г.Г., Зобачева А.Ю., Фаизов И.Н. Экспериментально-теоретические исследования устойчивости и верификация расчетных моделей большепролетных деревянных арок // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2011. № 2(160). С. 83–90. EDN: NТОKGR
15. Миряев Б.В., Толушов С.А., Сюзюмов Д.С. Экспериментальное исследование модели полусферического сетчатого купола // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2016. № 9(693). С. 103–111. EDN: XQZACN

16. Ахмедов А.Д., Кальмова М.А. К вопросу исследования вантово-стержневой конструкции покрытия, круглого в плане // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство и строительные технологии: сборник статей 79-й Всероссийской научно-технической конференции, Самара, 18–22 апреля 2022 года. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2022. С. 861–867. EDN: ROVPLQ
17. Ким А.Ю., Полников С.В. Сравнение экспериментального и численного исследования большепролетного пневматического линзообразного сооружения // Научное обозрение. 2016. № 15. С. 36–41. EDN: WMDTDZ
18. Bridgens B.N., Birchall M. Form and function: the significance of material properties in the design of tensile fabric structures // *Engineering Structures*. 2012. № 44. P. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.05.044>
19. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. Москва: КноРус, 2010. 480 с.
20. Киселев Д.Б. Арочно-вантовые комбинированные конструкции. Численные и экспериментальные исследования // Современное промышленное и гражданское строительство. 2006. Т. 2, № 1. С. 17–27. EDN: LALAXJ

REFERENCES

1. Ereemeev P.G. Cable-stayed combined structural system “Tensegrity”. *Industrial and Civil Engineering*, 2021, no. 1, pp. 21–27. (In Russ.).
2. Habibi T., Rhode-Barbarigos L., Keller T. Effects of prestress implementation on self-stress state in large-scale tensegrity structure. *Engineering Structures*, 2023, vol. 288, art. 116222. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116222>
3. Snelson K. The art of tensegrity. *International Journal of Space Structures*, 2012, vol. 27, no. 2-3, pp. 71–80. <https://doi.org/10.1260/0266-3511.27.2-3.71>
4. Kmet S., Tomko M., Soltys R., Rovnak M., Demjan I. Complex failure analysis of a cable-roofed stadium structure based on diagnostics and tests. *Engineering Failure Analysis*, 2019, vol. 103, pp. 443–461. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.04.051>
5. Farfel M., Gukova M., Kondrashov D., Konyashin D. Proven methods of monitoring in buildings and structures. *Bulletin of Science and Research Center of Construction*, 2021, no. 1(28), pp. 110–123. (In Russ.). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-1\(28\)-110-123](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-1(28)-110-123)
6. Ereemeev P.G. Hanging structures. *Construction materials*, 2022, no. 10, pp. 62–67. (In Russ.) <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-807-10-62-67>
7. Yu X., Yaozhi L., Yafeng W., Xian X., Hua-Ping W., Yanbin S., Wenwei F. A new configuration of Geiger-type cable domes with sliding ridge cables. Computational framework and structural feasibility investigation. *Engineering Structures*, 2023, vol. 286, art. 116028. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116028>
8. Zhang A., Shangguan G., Zhang Y., Zou M., Luo C. Structural behavior of a fully assembled cable-piercing ridge-tube cable dome with modular assembly ring truss. *Journal of Constructional Steel Research*, 2023, vol. 211, art. 108193. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2023.108193>
9. Sudarshan K. Structural design and behavior of prestressed cable domes. *Engineering Structures*, 2020, vol. 209, art. 110294. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110294>
10. Xiangyu Y., Yan Y., Zhihua C., Qing M. Mechanical properties of a hybrid cable dome under non-uniform snow distribution. *Journal of Constructional Steel Research*, 2019, vol. 153, pp. 519–532. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.10.022>
11. Mikhailov V.V., Chesnokov A.V. Cable roof structure with flexible fabric covering. *The VIII international conference on textile composites and inflatable structures: Proceedings of conference, Munich, Germany, October 2017*, pp. 436–447. URL: <http://congress.cimne.com/membranes2017/ frontal/Doc/Ebook2017.pdf> (accessed: January 25, 2024).
12. Ereemeev P.G., Tusnin A.R. Experimental studies of a membrane roof model for an industrial building. *Structural Mechanics and Analysis of Constructions*, 1992, no. 1, pp. 65–70. (In Russ.).
13. Zheng Y., Li S., Xu X. Experimental study on a novel cable-strut truss. *Engineering Structures*, 2022, vol. 265, art. 114491. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114491>

14. Kashevarova G.G., Zobacheva A.Yu., Faizov I.N. Experimental and theoretical analysis of stability and validation of computer models span wooden arches. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus region. Technical Sciences*, 2011, no. 2(160), pp. 83–90. (In Russ.).
15. Miryaev B.V., Tolushov S.A., Syuzyumov D.S. Experimental research of model of hemispherical mesh dome. *News of higher educational institutions. Construction*, 2016, no. 9(693), pp. 103–111. (In Russ.).
16. Akhmedov A.D., Kalmova M.A. Study the cable-stayed-rod structure of a covering round in plan. *Traditions and innovations in construction and architecture: Proceedings of the 79th All-Russian Scientific and Technical Conference, Samara, April 18–22, 2022*. Samara, Samara State Technical University, 2022. P. 861–867. (In Russ.).
17. Kim A.Yu., Polnikov S.V. Comparing the experimental and computational investigations of longspan air lentiform structure. *Scientific Review*, 2016, no. 15, pp. 36–41. (In Russ.).
18. Bridgens B.N., Birchall M. Form and function: the significance of material properties in the design of tensile fabric structures. *Engineering Structures*, 2012, no. 44, pp. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.05.044>
19. Venttsel' E.S., Ovcharov L.A. Probability theory and its engineering applications. Moscow, Knorus Publ., 2010. 480 p. (In Russ.)
20. Kiselev D.B. Arch-cable combined structures. Numerical and experimental studies. *Modern industrial and civil construction*, 2006, vol. 2. no. 1, pp. 17–27. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Чесноков Андрей Владимирович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительного производства, Липецкий государственный технический университет, Липецк, Российская Федерация, andreychess742@mail.ru, SPIN-код: 1609-9249, <https://orcid.org/0000-0003-3687-0510>

Andrei V. Chesnokov, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Construction Production, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russian Federation, andreychess742@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3687-0510>

Михайлов Виталий Витальевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительного производства, Липецкий государственный технический университет, Липецк, Российская Федерация, mmvv46@rambler.ru, SPIN-код: 9291-8589, <https://orcid.org/0000-0001-8274-9346>

Vitalii V. Mikhailov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of Construction Production, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russian Federation, mmvv46@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8274-9346>

Долматов Иван Викторович – старший преподаватель кафедры строительного производства, Липецкий государственный технический университет, Липецк, Российская Федерация, dolmivv@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7066-3366>

Ivan V. Dolmatov, Senior Lecturer of the Department of Construction Production, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russian Federation, dolmivv@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7066-3366>

Статья поступила в редакцию / Received: 15.02.2024.

Доработана после рецензирования / Revised: 04.03.2024.

Принята к публикации / Accepted: 10.06.2024.