

Известия вузов. Строительство. 2022. № 5. С. 41–56.

ISSN 0536-1052

News of Higher Educational Institutions. Construction. 2022; (5): 41–56.

ISSN 0536-1052

Научная статья

УДК 624.016

DOI: 10.32683/0536-1052-2022-761-5-41-56

КАРКАСНО-ТЕНТОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ ПОКРЫТИЯ ШЕДОВОГО ТИПА

Андрей Владимирович Чесноков, Виталий Витальевич Михайлов

Липецкий государственный технический университет (ЛГТУ), Липецк, Россия

Аннотация. Тентовые конструкции эффективны как для временных, так и для постоянных зданий и сооружений. Рассмотрена каркасно-тентовая конструкция покрытия, состоящая из арочных ребер, мягкой оболочки, тросов-подборов и стабилизирующих тросов, проходящих поперек пролета. Исследовано влияние геометрических параметров и уровня предварительного напряжения мягких оболочек на их работу под нагрузкой. Выполнен численный анализ фрагментов мягкой оболочки. Произведено сравнение оболочек по критерию деформативности под нагрузкой. Получены зависимости для относительных жесткостей оболочек и максимальных мембранных напряжений. Оценены предельно допустимые размеры оболочек по ширине из условий двух групп предельных состояний. Результаты работы вносят вклад в развитие тентовых строительных конструкций. Они могут быть применены при проектировании конструкций покрытия зданий и сооружений общественного и промышленного назначения.

Ключевые слова: тентовая конструкция, мягкая оболочка, конструкция покрытия, шедовое покрытие, геометрические параметры, предварительное напряжение

Для цитирования: Чесноков А.В., Михайлов В.В. Каркасno-тентовые конструкции покрытия шедового типа // Известия вузов. Строительство. 2022. № 5. С. 41–56. DOI: 10.32683/0536-1052-2022-761-5-41-56.

Original article

FRAMED TENT ROOF STRUCTURES OF THE SAWTOOTH TYPE

Andrei V. Chesnokov, Vitaliy V. Mikhailov

Lipetsk State Technical University (LSTU), Lipetsk, Russia

Abstract. Tent structures are an efficient solution for temporary and permanent buildings and constructions. The framed tent roof structure is considered in the present work. It consists of arched ribs, soft membrane, catenary cables and backstay wire ropes. The ropes are arranged across the span of the building. The influence of geometrical parameters and pre-stress level of the membrane on its structural behavior under load is investigated. Numerical analysis of the soft membrane structures is performed. The membranes are compared under the condition of deformability. The expressions for the relative membrane stiffnesses and the peak membrane stresses are given. The allowable membrane width is estimated under the conditions of the ultimate and serviceability limit

states. The work contributes to the development of the tent building constructions. Its results may be used for designing the roofs of public and industrial buildings.

Keywords: tent structure, soft membrane, roof construction, sawtooth roof, geometrical parameters, pre-stress

For citation: Chesnokov A.V., Mikhailov V.V. Framed tent roof structures of the sawtooth type. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2022; (5): 41–56. (In Russ.). DOI: 10.32683/0536-1052-2022-761-5-41-56.

1. Введение. Тентовые строительные конструкции представляют собой совокупность мягкой оболочки, выполняющей несущие и ограждающие функции, и поддерживающих ее элементов (СП 384.1325800.2018). Они обладают малым собственным весом и являются эффективным решением как для временных сооружений сезонного характера [1–3], так и для выставочных и торговых павильонов, стадионов, дворцов спорта и объектов транспортной инфраструктуры (рис. 1), эксплуатирующихся длительный период [4, 5].

Мягкая оболочка состоит из полиэфирной ткани либо стеклоткани с покрытием, пластифицированным ПВХ, тефлоном или силиконом [6]. Оболочка, будучи светопропускаемой и химически инертной к большинству атмосферных загрязнителей, обладает потенциалом для применения в промышленном строительстве. Разработка тентовых конструкций, в которых мягкие оболочки представляют совокупность крупногабаритных полотен, монтируемых в проектное положение с минимальными трудозатратами, является перспективным направлением.

Мягкие оболочки способны работать только на растяжение. Для восприятия знакопеременных внешних воздействий они нуждаются в предварительном напряжении. По способу создания преднапряжений мягкие оболочки разделяются на механически и пневматически напрягаемые конструкции. В оболочках пневматического типа растягивающие напряжения создаются избыточным давлением воздуха [7]. Пневматические конструкции характеризуются малыми трудозатратами на возведение и простыми конструктивными решениями. Вместе с тем их эксплуатация связана с энергопотреблением для поддержания необходимого давления во внутреннем объеме. В связи

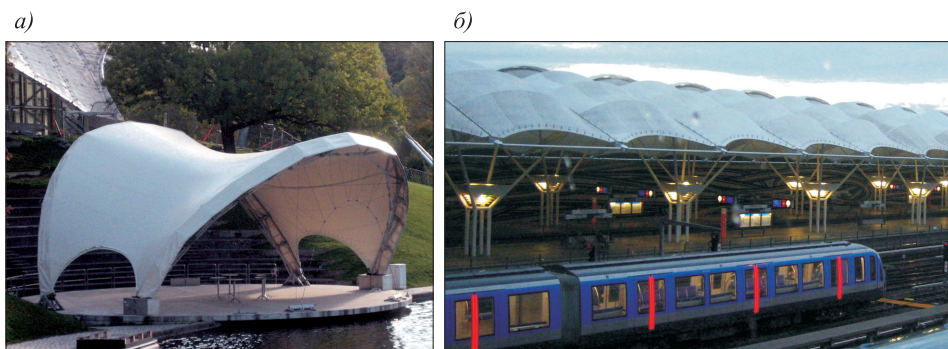


Рис. 1. Тентовые строительные конструкции
a – беседка в Олимпийском парке; *б* – железнодорожная станция (Мюнхен)

Fig. 1. Tent building structures
a – gazebo in the Olympic Park; *b* – railway station (Munich)

с этим получили развитие оболочки, механически напрягаемые высокопрочными тросами и оттяжками. Мелкие повреждения таких оболочек не оказывают критического влияния на возможность их дальнейшей эксплуатации. Поверхность механически напрягаемых оболочек должна иметь отрицательную гауссову кривизну, а для их натяжения необходимо предусмотреть специальные конструктивные решения [8–11].

Элементы, поддерживающие мягкую оболочку, решаются в виде линейно-протяженных и точечных опор. К первому типу относятся балки, арки и рамы, а также гибкие ванты. Точечные опоры в виде стоек, мачт и оттяжек воспринимают сосредоточенные нагрузки от мягкой оболочки. Точечные опоры с гибкими тросами-подборами, пропускаемыми в карманы по наружному контуру мягкой оболочки, образуют бескаркасные тентовые конструкции, которые находят применение во временных навесах, козырьках и малых архитектурных формах [12]. Гибкие контурные опоры обладают значительной деформативностью и передают большие распоры на стойки и мачты.

При объединении точечных опор гибкими вантами, расположенными поперек пролета, образуются подвесные тентовые конструкции, которые можно разделить на складчатые и шатровые (рис. 2). В складчатых покрытиях мягкая оболочка имеет форму «гармоники» [13], ребрами которой являются попеременно выпуклые и вогнутые ванты. Шатровые оболочки поддерживаются несущими вантами при помощи оттяжек. Получили распространение также шатровые оболочки, подвешенные к вершинам внутренних стоек. Внутренние стойки, в свою очередь, опираются на фундаменты либо удерживаются диагональными оттяжками, соединенными с основными несущими конструкциями каркаса покрытия [14, 15].

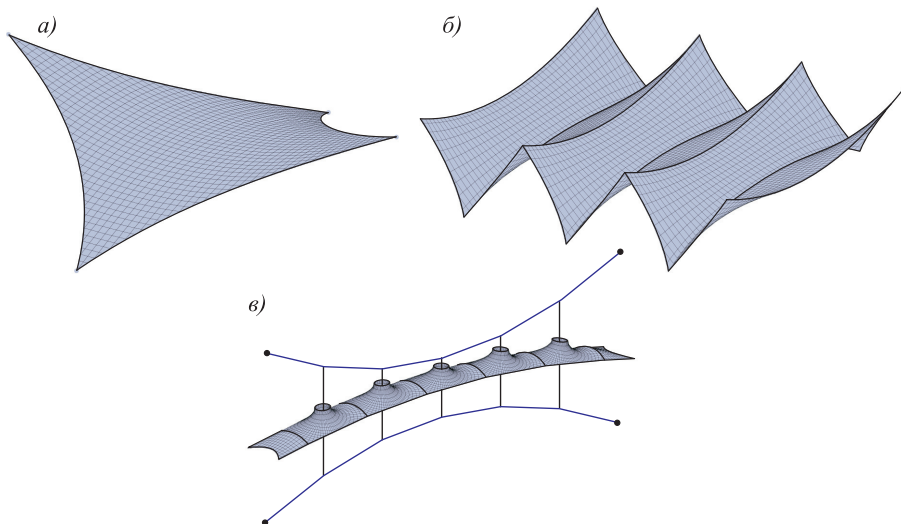


Рис. 2. Бескаркасные тентовые конструкции

a – седловидное покрытие с гибкими тросами-подборами (гипар); *б* – складчатое покрытие; *в* – шатровое покрытие с оттяжками

Fig. 2. Frameless awning structures

a – saddle-shaped covering with flexible pick-up cables (hypar); *b* – folded covering; *c* – tent covering with guy ropes

Тентовые конструкции с линейно-протяженными опорами в виде жестких на изгиб ребер находят более широкое применение в зданиях капитального назначения по сравнению с подвесными сооружениями. Обладая меньшей деформативностью, жесткие опорные конструкции полностью или частично воспринимают распоры от мягкой оболочки, формируя несущий каркас покрытия [16].

В многообразии тентовых конструкций каркасного типа можно выделить арочные и шедовые покрытия, в которых мягкая оболочка опирается на ребра, расположенные параллельно друг другу (рис. 3), а свободные грани оболочек снабжены натягающими тросами-подборами. В оболочках шедового типа регулирование начального натяжения производится стабилизирующими тросами, проходящими поперек перекрываемого пролета.

Мягкие оболочки отличаются сложным нелинейным поведением под нагрузкой. Учет механических характеристик материала и сравнение математических моделей оболочек приведены в [17]. Рассмотрены основные этапы статического расчета и проектирования тентовых конструкций. В [18] подчеркивается, что применение различных методов анализа и расчетных предпосылок разработчиками проекта тентовой конструкции зачастую приводит к разным результатам. При одинаковых исходных данных отличия имеют место в получаемых мембранных напряжениях, перемещениях и опорных реакциях. Это свидетельствует о необходимости совершенствования методов расчета тентовых конструкций.

В [19] приводится анализ работы под нагрузкой оболочек седловидной формы бескаркасного типа и арочных каркасных покрытий. При неизменных геометрических размерах в плане в качестве варьируемых параметров были приняты высоты рассматриваемых тентовых конструкций, радиусы кривизны и направление разрезки мягких оболочек. Для арочных покрытий каркасного типа делается вывод, что с ростом кривизны уменьшается чувствительность конструкции к вариации жесткостных характеристик материала оболочки. Работа под нагрузкой покрытий седловидной формы существенно зависит от направления разрезки оболочки. Следовательно, диагональная разрезка более предпочтительна по сравнению с разрезкой в ортогональном направлении с точки зрения снижения деформаций и пиковых напряжений [19].

Форма поверхности мягкой оболочки зависит от соотношения мембранных напряжений. Теоретические основы поиска равновесной формы применительно к различным типам тентовых конструкций рассмотрены в [20]. Одним из широко распространенных методов определения начального положения гибких

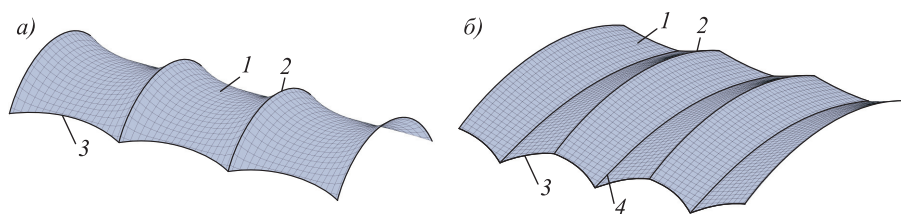


Рис. 3. Каркасно-тентовые конструкции покрытия: арочное (а); шедовое (б)
1 – мягкая оболочка покрытия; 2 – арка; 3 – трос-подбор; 4 – стабилизирующий трос

Fig. 3. Frame-awning structures of the coating: arched (a); shedovoe (b)
1 – soft shell of the coating; 2 – arch; 3 – cable selection; 4 – stabilizing cable

мембранных конструкций и вантовых сетей является метод плотности сил [21]. Проблема поиска формы гибридных конструкций, включающих жесткие на изгиб арки и мягкую оболочку покрытия, рассмотрена в [22].

Конечно-элементный подход к статическому анализу гибких мембран при помощи специализированных программных комплексов описан в [23]. Приведены особенности численного моделирования крупно- и мелкоразмерных конструкций, а также трансформируемых и адаптирующихся систем.

Результаты численного анализа каркасных тентовых конструкций приведены в [24, 25]. Делается вывод о необходимости совместного расчета несущего каркаса и мягкой оболочки, так как традиционный подход, основанный на передаче мембранных реакций на отдельно стоящий каркас, приводит к завышенным напряжениям и перерасходу материала.

Исходя из приведенного литературного обзора следует вывод о перспективности и целесообразности применения каркасных тентовых конструкций в покрытиях зданий и сооружений. Вопросы численного статического анализа тентовых покрытий находят отражение в имеющихся источниках. Вместе с тем проблема влияния основных параметров тентовых конструкций на их напряженно-деформированное состояние требует дополнительной проработки. Конкретизации также подлежит область эффективного применения тентовых конструкций.

Цель предлагаемого исследования – выявление влияния геометрических параметров и уровня предварительного напряжения мягких оболочек шедового типа на их работу под нагрузкой и оценка основных размеров оболочек для применения в конструкциях покрытий зданий.

2. Основная часть. Рассмотрена каркасно-тентовая конструкция шедового типа, предназначенная для покрытия прямоугольного в плане здания (см. рис. 3, б). Исследование работы под нагрузкой тентовой конструкции выполнено путем численного моделирования мягких оболочек в программном комплексе EASY.2020 [26].

Приняты оболочки шириной (B) 3,0; 4,5; 6,0; 7,5 и 9,0 м, пролетом (L) 12,0; 24,0 и 36,0 м (рис. 4). Отношение стрелы подъема арочных ребер, несущих мягкую оболочку, к пролету принято $f_1/L = 1/10$. Ребра считаются абсолютно жесткими с неподвижными закреплениями во всех промежуточных узлах. Концы стабилизирующих тросов смещены на $\Delta h = 0,5$ м вниз относительно нижних опор арочных ребер. Отношение стрел стабилизирующих тросов f_2 к их пролетам L_2 принято в двух вариантах: $f_2/L_2 = 1/12$ и $f_2/L_2 = 1/18$.

Мягкие оболочки покрытия приняты из тентового материала, имеющего жесткости $E_w = 1200$ и $E_f = 800$ кН/м в направлении «основы» и «утка» соответственно. В рамках выполненного численного моделирования оболочки заданы сеткой конечных элементов, шарнирно соединенных между собой в узлах и способных работать только на растяжение. В [27] проведено исследование влияния размеров ячеек сети на результаты численного моделирования мягкой оболочки под нагрузкой. Делается вывод, что изменение размера ячейки l_w от 0,1 до 0,6 м, соответствующее 1/60–1/10 ширины оболочки, оказывает незначительное влияние на характер распределения напряжений. Таким образом, в настоящей работе для оболочек шириной $B = 3,0$ м принята сеть размером ячейки $0,3 \times 0,3$ м ($l_w/B = 1/10$), для оболочек

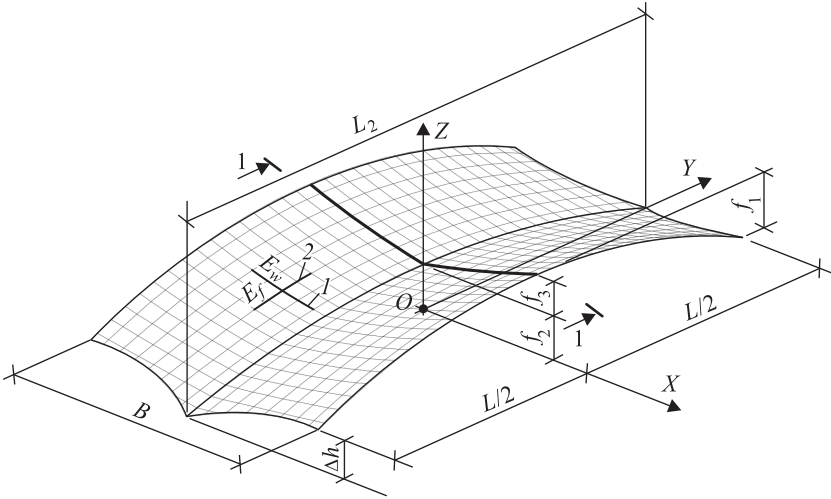


Рис. 4. Мягкая оболочка покрытия

1, 2 – направление «основы» и «утка» мягкой оболочки соответственно; 1-1 – сечение, показанное на рис. 5 и 6

Fig. 4. The soft shell of the coating

1, 2 – the direction of the «warp» and «weft» of the soft shell, respectively; 1-1 – the cross section shown in Fig. 5 and 6

шириной $B = 4,5$ и $6,0$ м размер ячейки составляет $0,4 \times 0,4$ м (при отношениях l_w / B равных $1/11,25$ и $1/15$), для оболочек шириной $B = 7,5$ м размер ячейки – $0,45 \times 0,45$ м ($l_w / B = 1/16,7$) и для оболочек шириной $B = 9,0$ м – $0,5 \times 0,5$ м ($l_w / B = 1/18$).

Предварительные напряжения оболочек одинаковы в направлении «основы» и «утка» тентового материала. Принято несколько вариантов предварительного напряжения: $P_{r,1} = 1,0$, $P_{r,2} = 5,5$ и $P_{r,3} = 10,0$ кН/м. Начальная форма поверхности оболочки найдена методом плотности сил в программном комплексе EASY.2020 [26].

Исследование работы мягких оболочек выполнено на такие нагрузки, как ветровая на шедовое покрытие W интенсивностью $0,5$ кН/м²; равномерная снеговая Sn_1 интенсивностью $1,8$ кН/м² и снеговая Sn_2 интенсивностью $1,8$ кН/м² на половине ширины оболочки (рис. 5).

Сечения оболочек пролетом $L = 24,0$ м, имеющих отношение стрел стабилизирующих тросов к пролету $f_2 / L_2 = 1/18$, проиллюстрированы на рис. 6. Сечения расположены по коньку покрытия в плоскости XOZ . Схема расположения осей показана на рис. 4.

Из рис. 6 видно, что уменьшение ширины оболочки и увеличение предварительного напряжения ведут к снижению ее деформаций.

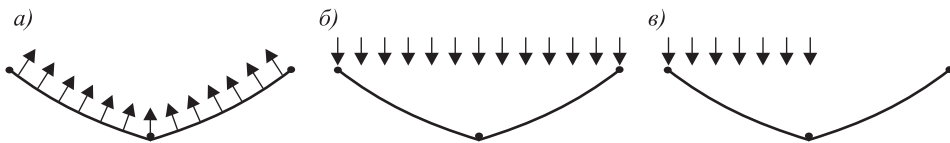


Рис. 5. Ветровая W (а), снеговая Sn_1 (б), снеговая Sn_2 (в) нагрузки на оболочку покрытия

Fig. 5. Wind W (a), snow Sn_1 (b), snow Sn_2 (c) loads on the coating shell

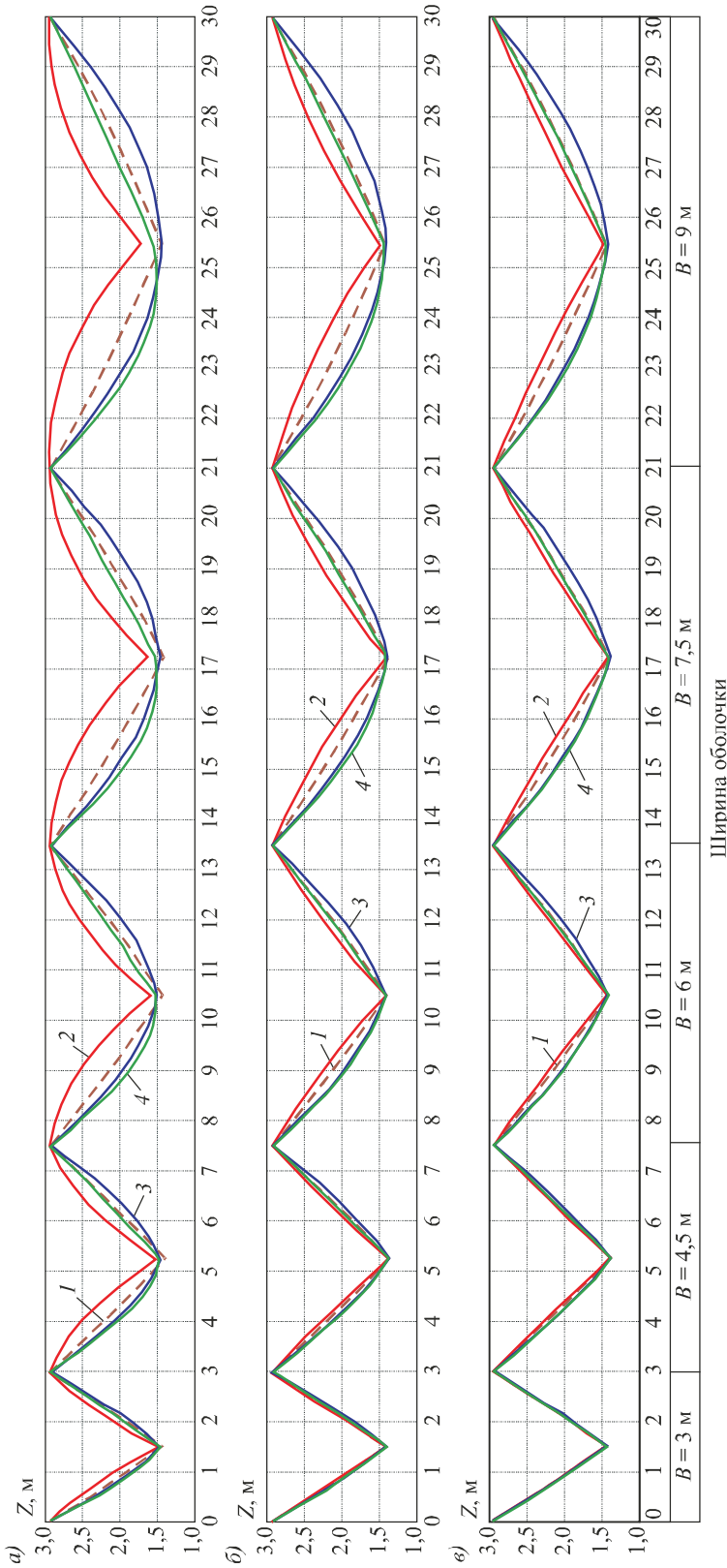


Рис. 6. Сечения мягких оболочек пролетом $L=24,0 \text{ м}$ плоскостью XOZ при отношении стрел стабилизирующих тросов к пролету $f_2/L_2 = 1/18$

$a-c$ – предварительные напряжения оболочки $P_{r,1}=1,0$, $P_{r,2}=5,5$ и $P_{r,3}=10,0 \text{ кН/м}$ соответственно.

1 – начальное положение (без нагрузки); 2 – действие ветровой нагрузки W ; 3 – действие снеговой нагрузки Sn_1 ; 4 – действие снеговой нагрузки Sn_2

Fig. 6. Sections of soft shells with a span of $L=24,0 \text{ m}$ by the XOZ plane with the ratio of the arrows of the stabilizing cables to the span of $f_2/L_2 = 1/18$

$a-c$ – preliminary stresses of the shells $P_{r,1} = 1,0$, $P_{r,2} = 5,5$ and $P_{r,3} = 10,0 \text{ kN/m}$, respectively.

1 – initial position (without load); 2 – action of wind load W ; 3 – action of snow load Sn_1 ; 4 – action of snow load Sn_2

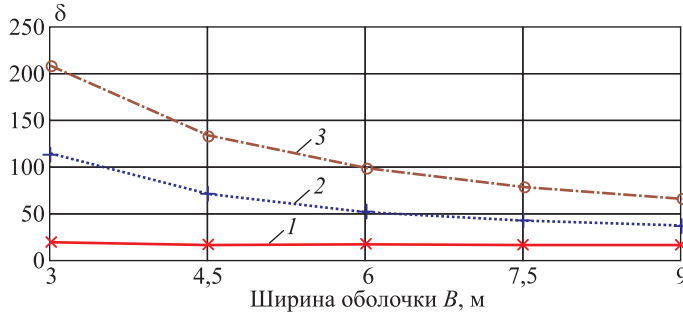


Рис. 7. Графики относительных жесткостей оболочек δ ($L = 24,0$ м, $f_2/L_2 = 1/18$, нагрузка ветровая W)
1–3 – предварительные напряжения оболочек $P_{r,1}$, $P_{r,2}$ и $P_{r,3}$ соответственно

Fig. 7. Graphs of relative stiffness of shells δ ($L = 24,0$ m, $f_2/L_2 = 1/18$, wind load W)
1–3 – preliminary stresses of shells $P_{r,1}$, $P_{r,2}$ and $P_{r,3}$, respectively

Для количественной характеристики оболочки, находящейся под действием нагрузок, предлагается ввести понятие относительной жесткости δ :

$$\delta = \frac{B}{\Delta_{\max}}, \quad (1)$$

где B – ширина оболочки, Δ_{\max} – максимальное абсолютное значение вертикальных перемещений.

Зависимости δ для оболочек, имеющих отношение стрел стабилизирующих тросов к пролету $f_2/L_2 = 1/18$ и находящихся под действием ветровой нагрузки W , приведены на рис. 7.

Из рис. 7 видно, что относительные жесткости оболочек обратно пропорциональны ширине B . Предлагается аппроксимировать отношения δ полиномиальными функциями второй степени $f^2(B, P_r, L)$ методом наименьших квадратов:

$$f^2(B, P_r, L) = k_{1,1} \frac{1}{B^2} + k_{2,2} P_r^2 + k_{3,3} L^2 + k_{1,2} \frac{P_r}{B} + k_{1,3} \frac{L}{B} + k_{2,3} P_r L + k_1 \frac{1}{B} + k_2 P_r + k_3 L + k_0, \quad (2)$$

где k – искомые коэффициенты полинома.

Для упрощения зависимости (2) необходимо отбросить незначимые слагаемые. Предлагается нормализовать аргументы $X = \{B, P_r, L\}$, входящие в функцию (2):

$$\delta(B, P_r, L) = f_n^2(B_n, P_{r,n}, L_n), \quad (3)$$

здесь n – преобразование соответствующего аргумента $X = \{B, P_r, L\}$:

$$X_n = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}, \quad (4)$$

где X_n – нормализованное значение аргумента, отмасштабированное в диапазон $X_n \in [0..1]$

X_{\min}, X_{\max} – наименьшее и наибольшее значение аргумента до нормализации.

Все множители, стоящие при коэффициентах k^n функции $f_n^2(B_n, P_{r,n}, L_n)$, принадлежат одинаковому диапазону [0...1]. Таким образом, значимость каждого слагаемого может быть оценена по абсолютному значению соответствующего коэффициента.

Рассмотрим оболочки с отношением $f_2/L_2 = 1/18$, находящиеся под действием ветровой нагрузки W . После нормализации факторов (4) получим следующие коэффициенты функции f_n^2 : $k_{1,1}^n = 9,7$, $k_{2,2}^n = 8,4$, $k_{3,3}^n = 5,1$, $k_{1,2}^n = 94,2$, $k_{1,3}^n = 5,0$, $k_{2,3}^n = -5,6$, $k_1^n = -27,2$, $k_2^n = 34,1$, $k_3^n = -24,1$, $k_0^n = 25,8$. Веса каждого коэффициента в общей сумме абсолютных значений коэффициентов следующие: $p_{1,1}^n = 4,0$, $p_{2,2}^n = 3,5$, $p_{3,3}^n = 2,1$, $p_{1,2}^n = 39,4$, $p_{1,3}^n = 2,1$, $p_{2,3}^n = 2,3$, $p_1^n = 11,4$, $p_2^n = 14,3$, $p_3^n = 10,1$, $p_0^n = 10,8$ %.

Отбросив из (2) слагаемые, содержащие коэффициенты k , для которых соответствующие коэффициенты k^n функции f_n^2 имеют веса p^n , не превышающие 10 %, вычислим упрощенную функцию относительной жесткости рассматриваемых мягких оболочек покрытия

$$\delta(B, P_r, L) = k_{1,2} \frac{P_r}{B} + k_1 \frac{1}{B} + k_2 P_r + k_3 L + k_0. \quad (5)$$

Коэффициенты функции (5), полученные для мягких оболочек, находящихся в условиях действия внешних нагрузок, сведены в табл. 1. Ошибки построенных математических моделей определены следующим образом:

$$\lambda(G, Y) = \frac{200}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|G_i - Y_i|}{G_i + Y_i}, \%, \quad (6)$$

где $N=45$ – количество рассматриваемых комбинаций факторов $X_i = \{B, P_r, L\}$, $i = [1...N]$; G_i и Y_i – результаты, полученные численным модели-

Таблица 1. Результаты аппроксимирования относительных жесткостей мягких оболочек функциональными зависимостями

Table 1. Results of approximation of relative stiffness of soft shells by functional dependencies

№ п/п	Нагрузка	Коэффициенты функции (5)					Ошибка λ , %, (6)
		$k_{1,2}$	k_1	k_2	k_3	k_0	
I. Оболочки с отношением $f_2 / L_2 = 1/12$							
1	Ветровая W	65,84	-58,91	-1,60	-0,72	40,67	7,8
2	Снеговая Sn_1	26,41	9,83	-2,39	-0,17	38,48	7,7
3	Снеговая Sn_2	28,17	-39,15	-2,31	-0,23	39,2	3,9
II. Оболочки с отношением $f_2 / L_2 = 1/18$							
4	Ветровая W	69,59	-50,13	-2,21	-0,54	29,01	5,5
5	Снеговая Sn_1	40,81	-38,57	-3,85	-0,06	42,24	8,0
6	Снеговая Sn_2	42,46	-44,14	-3,70	0,05	28,26	8,2

рованием оболочки в программном комплексе EASY.2020 и применением аппроксимирующей функции к комбинации факторов X_i соответственно.

Сравнение деформативности оболочек, имеющих различные отношения стрел стабилизирующих тросов к пролету f_2/L_2 , произведено при помощи соотношения μ :

$$\mu = \frac{\Delta_{\max,12}}{\Delta_{\max,18}}, \quad (7)$$

где $\Delta_{\max,12}$ и $\Delta_{\max,18}$ – максимальные абсолютные значения вертикальных перемещений оболочек, имеющих отношения стрел стабилизирующих тросов к пролету, f_2/L_2 , равные 1/12 и 1/18 соответственно.

Графики соотношений μ , приведенные на рис. 8, показывают, что оболочки с отношением стрелы стабилизирующих тросов к пролету $f_2/L_2 = 1/12$ в целом проявляют меньшую деформативность при действии ветровой нагрузки по сравнению с оболочками, имеющими отношение $f_2/L_2 = 1/18$. Действие снеговой нагрузки, напротив, вызывает избыточные деформации оболочек с отношением $f_2/L_2 = 1/12$. Исключение составляют оболочки с малым предварительным напряжением ($P_r = 1,0$ кН/м), для которых имеет место снижение деформативности до 24 %.

Пиковые напряжения в оболочках при действии нагрузок проиллюстрированы на рис. 9.

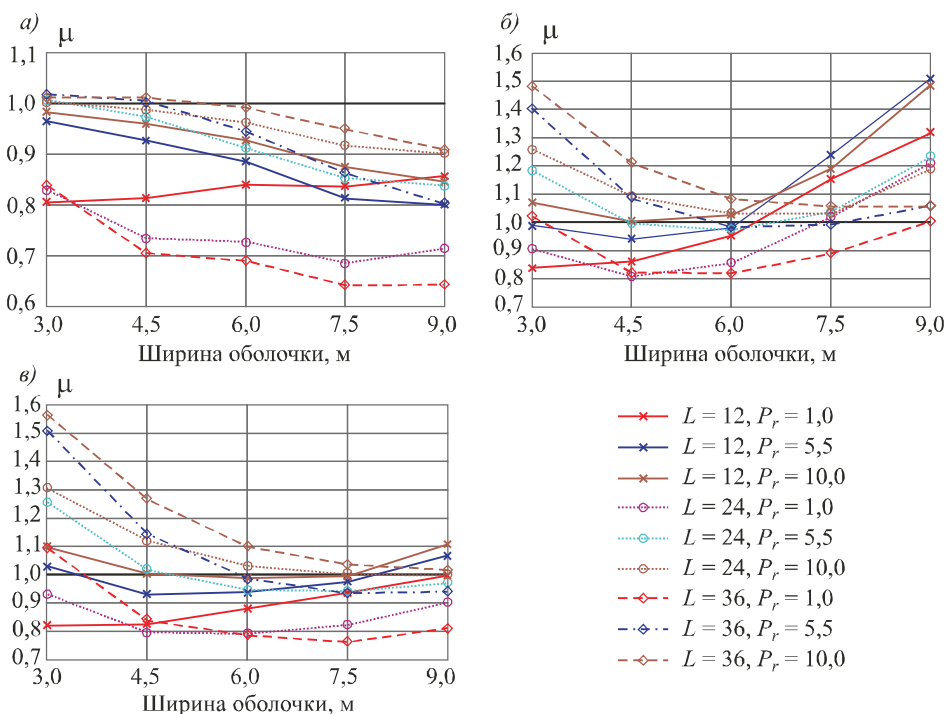


Рис. 8. Графики соотношений μ (7)

a – ветровая нагрузка W ; *b* – равномерная снеговая нагрузка Sn_1 ; *c* – неравномерная снеговая нагрузка Sn_2

Fig. 8. Graphs of the ratios μ (7)

a – wind load W ; *b* – uniform snow load Sn_1 ; *c* – uneven snow load Sn_2

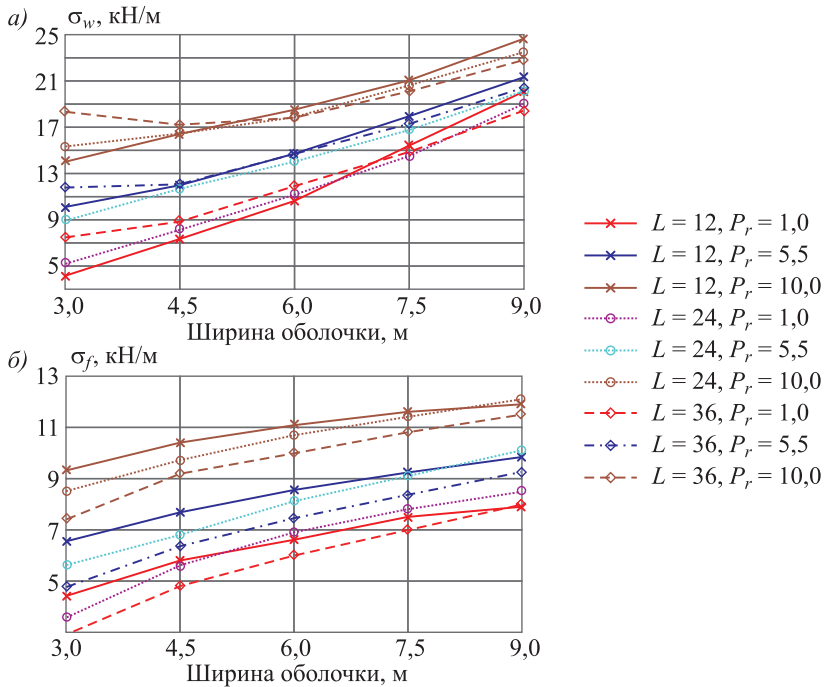


Рис. 9. Пиковые мембранные напряжения в оболочках, имеющих отношение стрел стабилизирующих тросов к пролету $f_2/L_2 = 1/18$

a, b – напряжения вдоль «основы» и «утка» (σ_w и σ_f) соответственно (направления «основы» и «утка» показаны на рис. 4)

Fig. 9. Peak membrane stresses in the shells having the ratio of the arrows of the stabilizing cables to the span $f_2/L_2 = 1/18$

a, b – stresses along the warp and weft (σ_w and σ_f), respectively (the warp and weft directions are shown in Fig. 4)

Мембранные напряжения в рассматриваемых оболочках предлагается аппроксимировать полиномиальными функциями второй степени:

$$f^2(B, P_r, L) = k_{1,1}B^2 + k_{2,2}P_r^2 + k_{3,3}L^2 + k_{1,2}BP_r + k_{1,3}BL + k_{2,3}P_rL + k_1B + k_2P_r + k_3L + k_0, \quad (8)$$

где k – искомые коэффициенты полинома.

Отбросив незначимые коэффициенты, приведем упрощенную зависимость к виду

$$\sigma(B, P_r, L) = k_{1,1}B^2 + k_{1,2}BP_r + k_{1,3}BL + k_1B + k_2P_r + k_3L + k_0. \quad (9)$$

Коэффициенты (9), найденные методом наименьших квадратов, приведены в табл. 2.

Приняв для мягкой оболочки тентовый материал Valmex Mehatop N, FR1000, получим требуемые предварительные напряжения в зависимости от ширины сектора $P_{r, req}(B)$ (рис. 10). При этом учтены условия:

$$\sigma_{w, f} \leq R_{w, f}^p, \quad (10)$$

Таблица 2. Результаты аппроксимирования пиковых мембранных напряжений в оболочках функциональными зависимостями

Table 2. Results of approximation of peak membrane stresses in shells by functional dependencies

№ п/п	Напряжение	Коэффициенты функции (9)							Ошибка λ , % (6)
		$k_{1,1}$	$k_{1,2}$	$k_{1,3}$	k_1	k_2	k_3	k_0	
I. Оболочки с отношением $f_2/L_2 = 1/12$									
1	σ_w	0,10	-0,09	-0,01	1,76	1,13	0,01	-0,43	2,7
2	σ_f	-0,03	-0,02	0,01	0,92	0,72	-0,05	1,28	8,5
II. Оболочки с отношением $f_2/L_2 = 1/18$									
3	σ_w	0,12	-0,12	-0,03	1,76	1,50	0,19	-4,62	3,2
4	σ_f	-0,05	-0,02	0,01	1,16	0,59	-0,09	1,42	6,7

$$\delta \geq \delta_{lim}, \tag{11}$$

где $\sigma_{w,f}$ – максимальные мембранные напряжения в оболочке (9) в направлении «основы» w и «утка» f тентового материала;

$R_{w,f}^p$ – расчетные сопротивления материала оболочки;

δ – относительная жесткость оболочки (5);

$\delta_{lim} = 75$ – принятое предельно допустимое значение относительной жесткости.

Материал мягкой оболочки соответствует типу III полиэфирных тканей с ПВХ покрытием (СП 384.1325800.2018) и имеет нормативные сопротивления в направлении «основы» и «утка»: $R_w^n = 120$ и $R_f^n = 110$ кН/м соответственно. Тогда с учетом коэффициента надежности $K_n = 4,8$ расчетные сопротивления оболочки составят $R_w^p = R_w^n / K_n = 25$ кН/м и $R_f^p = R_f^n / K_n = 22,9$ кН/м.

Из рис. 10 видно, что при условиях (10, 11) допустимо применение оболочек шириной не более 5,6 м (для $f_2/L_2 = 1/12$) и 6,2 м (для $f_2/L_2 = 1/18$).

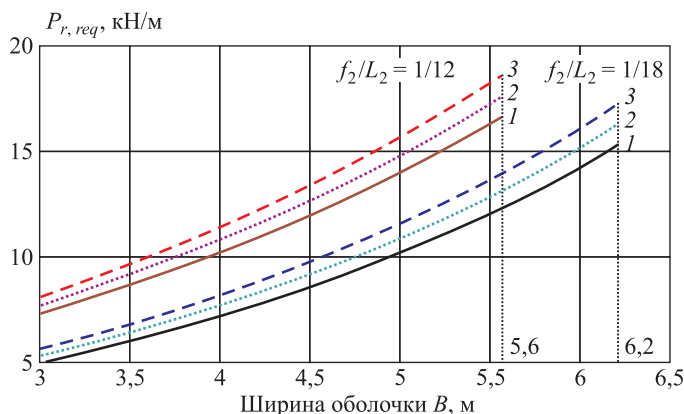


Рис. 10. Требуемые предварительные напряжения оболочек 1–3 – пролеты L , равные 12, 24 и 36 м соответственно

Fig. 10. Required preliminary stresses of the shells 1–3 – spans L , equal to 12, 24 and 36 m, respectively

Зависимости требуемых предварительных напряжений, полученные при различных пролетах L , близки друг к другу, что свидетельствует о работе оболочек «по короткому направлению», т.е. когда их напряженно-деформированное состояние в основном определяется шириной B .

3. Выводы. 1. Рассмотрена работа каркасных тентовых конструкций шедового типа, в которых мягкая оболочка представляет совокупность крупноразмерных полотен, опирающихся на арочные ребра и напрягаемых тросами-подборами. Регулирование предварительных напряжений оболочек производится стабилизирующими тросами, проходящими поперек перекрываемого пролета. Данное решение является перспективным для покрытия зданий и сооружений различного назначения, в том числе в промышленном строительстве, а также при освоении отдаленных и труднодоступных территорий.

2. Предложены функциональные зависимости, аппроксимирующие относительные жесткости оболочек и максимальные мембранные напряжения с учетом ширины оболочек B , пролета несущих арок L и предварительного напряжения P_r .

3. Выяснено, что рассматриваемые оболочки работают «по короткому направлению», а их напряженно-деформированное состояние в основном определяется шириной B . При этом влияние пролета несущих арок L незначительно.

4. Выполнено сравнение оболочек, имеющих различные отношения стрел стабилизирующих тросов к пролету f_2 / L_2 . Выяснено, что более пологие в коротком направлении оболочки (при $f_2 / L_2 = 1/12$) проявляют меньшую деформативность при действии ветровой нагрузки по сравнению с оболочками, имеющими отношение $f_2 / L_2 = 1/18$. Вместе с тем при воздействии снега деформативность пологих оболочек и уровень мембранных напряжений в них выше.

5. Установлено, что при условиях обеспечения несущей способности и ограничения деформативности рассматриваемых оболочек предельным прогибом (выгибом), равным $1/75$ от ширины B , более пологие в коротком направлении оболочки ($f_2 / L_2 = 1/12$) имеют меньшую допустимую ширину $5,6$ м, чем оболочки с отношением $f_2 / L_2 = 1/18$, для которых допустимая ширина B составляет $6,2$ м.

Список источников

1. Barozzi M., Viscuso S., Zanelli A. Design novel covering system for archaeological areas // Proceedings of VII International Conference on textile composites and inflatable structures. Structural membranes 2015. Barcelona, Spain. 2015. P. 105–114.
2. Llorens J., Zanelli A. Structural membranes for refurbishment of the architectural heritage // Procedia Engineering. 2016. No. 155. P. 18–27. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.003
3. Viscuso S., Dragoljevic M., Monticelli C., Zanelli A. Finite-element analysis and design optioneering of an emergency tent structure // Proceedings of the TensiNet Symposium. Softening the Habitats, 2019. P. 208–219.
4. Goppert K. High tension tensile architecture. New stadium projects // Proceedings of VI International Conference on textile composites and inflatable structures. Structural membranes 2013. Munich, Germany, 2013. P. 21–26.

5. *Llorens J.I.* Structural membranes for urban spaces // Proceedings of VII International Conference on textile composites and inflatable structures. Structural membranes 2015. Barcelona, Spain, 2015. P. 133–144.
6. *Houtman R.* There is no material like membrane material // Proceedings of the TensiNet Symposium. Designing tensile architecture, Brussel, September 19-20, 2003. P. 178–194.
7. *Ермолов В.В., Бэрд У.У., Бубнер Э. и др.* Пневматические строительные конструкции / под ред. В.В. Ермолова. М.: Стройиздат, 1983. 439 с.
8. *Bridgens B.N., Gosling P.D., Birchall M.J.S.* Tensile fabric structures: concepts, practice and developments // The Structural Engineer. 2004. Vol. 82, no. 14. P. 21–27.
9. *Seidel M.* Tensile Surface Structures: A Practical Guide to Cable and Membrane Construction. Wien: Ernst & Sohn, 2009. 229 p.
10. *Forster B., Mollaert M.* European design guide for tensile surface structures. Brussel: TensiNet, 2004. 354 p.
11. *Wagner R.* Bauen mit seilen und membranen. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2016. 517 p.
12. *Мыскова О.В.* Архитектура тентовых сооружений: проблемы формообразования (1990–2000 гг.): Дис. ... канд. архитектуры. М.: НИИ теории архитектуры и градостроительства, 2003. 279 с.
13. *Блинов Ю.И.* Тентовые здания и сооружения (аспекты мягких покрытий и перспектив развития): Дис. ... д-р техн. наук. М.: МИСИ, 1991. 401 с.
14. *Warner G.* Multiple peak cable tent. Пат. 6345638 США, 12.02.2002.
15. *Кудрявцева В.И.* Проектирование круговых шатровых оболочек тентовых покрытий строительных сооружений: Дис. ... канд. техн. наук. Казань: КГАСУ, 2016. 153 с.
16. *Chesnokov A.V., Mikhailov V.V., Dolmatov I.V.* Development of the hybrid dome and research of its behavior under load // Proceedings of the VII International Conference on textile composites and inflatable structures. Structural membranes. Barcelona, Spain, 2015. P. 469–476.
17. *Xu J., Zhang Y., Yu Q., Zhang L.* Analysis and design of fabric membrane structures: a systematic review on material and structural performance // Thin-Walled Structures. 2022. No. 170. P. 1–17. DOI: 10.1016/j.tws.2021.108619
18. *Gosling P.D., Bridgens B.N., Albrecht A. et al.* Analysis and design of membrane structures: results of a round robin exercise // Engineering Structures. 2012. Vol. 48. P. 313–328.
19. *Bridgens B., Birchall M.* Form and function: the significance of material properties in the design of tensile fabric structures // Engineering Structures. 2012. Vol. 44. P. 1–12.
20. *Strobel D., Singer P., Holl J.* Analytical formfinding // International Journal of Space Structures. 2016. Vol. 31, no. 1. P. 52–61. DOI: 10.1177/0266351116642076
21. *Tibert G.* Numerical analyses of cable roof structures. Licentiate Thesis. 1999. 174 p.
22. *Lang R., Nemeč I.* Form-finding of shell and membrane structures // Proceedings of VIII International Conference on textile composites and inflatable structures. Structural membranes. Munich, Germany, 2017. P. 303–310.
23. *Haug E., De Kermel P., Gawenat B., Michalski A.* Industrial design and analysis of structural membranes // International Journal of Space Structures. 2009. Vol. 24, no. 4. P. 191–204. DOI: 10.1260/026635109789968227
24. *Machacek J., Jermoljev D.* Steel structures in interaction with non-metallic membranes // Journal of Civil Engineering and Management. 2017. Vol. 23, no. 3. P. 368–377. DOI: 10.3846/13923730.2015.1128482
25. *Stroebel D., Holl J.* On the calculation of textile halls // Proceedings of X International Conference on textile composites and inflatable structures. Structural membranes. Munich, Germany, 2021. 7 p. DOI: 10.23967/membranes.2021.043

26. Easy 2020. Program Description. Technet GmbH, 2019.
27. Chesnokov A.V., Mikhailov V.V., Dolmatov I.V. The influence of material aging on the structural behavior of a flexible roof with a polymer membrane shell // Computer Methods in Materials Science. 2021. Vol. 21, no. 1. P. 13–23.

References

1. Barozzi M., Viscuso S., Zanelli A. Design novel covering system for archaeological areas. Proceedings of VII International Conference on textile composites and inflatable structures. Structural membranes 2015. Barcelona, Spain, 2015. P. 105–114.
2. Llorens J., Zanelli A. Structural membranes for refurbishment of the architectural heritage. *Procedia Engineering*. 2016; (155): 18–27. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.003
3. Viscuso S., Dragoljevic M., Monticelli C., Zanelli A. Finite-element analysis and design optioneering of an emergency tent structure. Proceedings of the TensiNet Symposium. Softening the Habitats, 2019. P. 208–219.
4. Goppert K. High tension tensile architecture. New stadium projects // Proceedings of VI International Conference on textile composites and inflatable structures. Structural membranes 2013. Munich, Germany, 2013. P. 21–26.
5. Llorens J.I. Structural membranes for urban spaces. Proceedings of VII International Conference on textile composites and inflatable structures. Structural membranes 2015. Barcelona, Spain, 2015. P. 133–144.
6. Houtman R. There is no material like membrane material. Proceedings of the TensiNet Symposium. Designing tensile architecture, Brussel, September 19-20, 2003. P. 178–194.
7. Ermolov V.V., Berd U.U., Bubner E. et al. Pneumatic building constructions. Ed. by V.V. Ermolov. Moscow: Stroyizdat, 1983. 439 p. (In Russ.).
8. Bridgens B.N., Gosling P.D., Birchall M.J.S. Tensile fabric structures: concepts, practice and developments. *The Structural Engineer*. 2004; 82(14): 21–27.
9. Seidel M. Tensile Surface Structures: A Practical Guide to Cable and Membrane Construction. Wien: Ernst & Sohn, 2009. 229 p.
10. Forster B., Mollaert M. European design guide for tensile surface structures. Brussel: TensiNet, 2004. 354 p.
11. Wagner R. Bauen mit seilen und membranen. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2016. 517 p.
12. Myskova O.V. Architecture of tent constructions: the problems of shape determination: Diss. ... PhD. Moscow, 2003. 279 p. (In Russ.).
13. Blinov Yu.I. Tent buildings and structures (the aspects of soft roofs and perspectives of the development): Diss. ... DSc. Moscow: MISI, 1991. 401 p. (In Russ.).
14. Warner G. Multiple peak cable tent. Pat. 6345638 USA, 12.02.2002.
15. Kudryavtseva V.I. Designing of round-shaped marquee shells of tent roofs of building constructions: Diss. ... PhD. Kazan: KSUAE, 2016. 153 p. (In Russ.).
16. Chesnokov A.V., Mikhailov V.V., Dolmatov I.V. Development of the hybrid dome and research of its behavior under load. Proceedings of the VII International Conference on textile composites and inflatable structures. Structural membranes. Barcelona, Spain, 2015. P. 469–476.
17. Xu J., Zhang Y., Yu Q., Zhang L. Analysis and design of fabric membrane structures: a systematic review on material and structural performance. *Thin-Walled Structures*. 2022; (170): 1–17. DOI: 10.1016/j.tws.2021.108619
18. Gosling P.D., Bridgens B.N., Albrecht A. et al. Analysis and design of membrane structures: results of a round robin exercise. *Engineering Structures*. 2012; 48: 313–328.
19. Bridgens B., Birchall M. Form and function: the significance of material properties in the design of tensile fabric structures. *Engineering Structures*. 2012; 44: 1–12.

20. Strobel D., Singer P., Holl J. Analytical formfinding. *International Journal of Space Structures*. 2016; 31(1): 52–61. DOI: 10.1177//0266351116642076
21. Tibert G. Numerical analyses of cable roof structures. Licentiate Thesis. 1999. 174 p.
22. Lang R., Nemeč I. Form-finding of shell and membrane structures. Proceedings of VIII International Conference on textile composites and inflatable structures. Structural membranes. Munich, Germany, 2017. P. 303–310.
23. Haug E., De Kermel P., Gawenat B., Michalski A. Industrial design and analysis of structural membranes. *International Journal of Space Structures*. 2009; 24(4): 191–204. DOI: 10.1260/026635109789968227
24. Machacek J., Jermoljev D. Steel structures in interaction with non-metallic membranes. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2017; 23(3): 368–377. DOI: 10.3846/13923730.2015.1128482
25. Stroebel D., Holl J. On the calculation of textile halls. Proceedings of X International Conference on textile composites and inflatable structures. Structural membranes. Munich, Germany, 2021. 7 p. DOI: 10.23967/membranes.2021.043
26. Easy 2020. Program Description. Technet GmbH, 2019.
27. Chesnokov A.V., Mikhailov V.V., Dolmatov I.V. The influence of material aging on the structural behavior of a flexible roof with a polymer membrane shell. *Computer Methods in Materials Science*. 2021; 21(1): 13–23.

Информация об авторах

А.В. Чесноков – кандидат технических наук, доцент, andreychess742@gmail.com

В.В. Михайлов – доктор технических наук, профессор, mmvv46@rambler.ru

Information about the authors

A.V. Chesnokov – PhD, Ass. Professor, andreychess742@gmail.com

V.V. Mikhailov – DSc, Professor, mmvv46@rambler.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 22.03.2022
Одобрена после рецензирования 22.04.2022
Принята к публикации 29.04.2022

The article was submitted 22.03.2022
Approved after reviewing 22.04.2022
Accepted for publication 29.04.2022