

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ¹

УДК 624.011

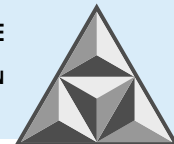
DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-2-22-34

Нелинейный метод прогнозирования ползучести и релаксации напряжения конструктивных элементов текстильных фасадов

Ю. Херрати, Д.В. Ковалев, О.Н. Столяров

Юнес Херрати, Дмитрий Вячеславович Ковалев, Олег Николаевич Столяров*

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация
*kherratighazouaniyounes@gmail.com, kovalevm1tya@yandex.ru, stolyarov_on@spbstu.ru**



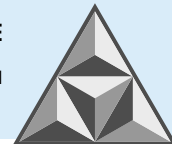
Рассмотрены основные параметры, влияющие на механические свойства и долговечность конструктивных элементов текстильных фасадов. Предлагается математическая модель, представляющая нелинейный метод прогнозирования указанных параметров. Результаты расчета позволяют создать общую функцию ползучести и релаксации напряжения для определенного срока службы текстильного фасада. Проведены исследования ползучести и релаксации напряжения ограждающих конструкций зданий, изготовленных из текстильных материалов.

Ключевые слова: текстильные фасады, тканые материалы, нелинейный метод, прогнозирование ползучести, релаксация напряжения

Для цитирования:

Ю. Херрати, Д.В. Ковалев, О.Н. Столяров. Нелинейный метод прогнозирования ползучести и релаксации напряжения конструктивных элементов текстильных фасадов // *Умные композиты в строительстве*. 2025. Т. 6, вып. 2. С. 22-34. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/6061/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-2-22-34



SCIENTIFIC ARTICLE²

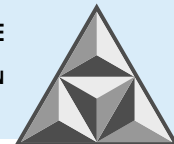
DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-2-22-34

Nonlinear method for predicting creep and stress relaxation of structural elements of textile facades

Y. Kherrati, D.V. Kovalev, O.N. Stolyarov

Younes Kherrati, Dmitriy Vyacheslavovich Kovalev, Oleg Nikolaevich Stolyarov*

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation,
*kherratighazouaniyounes@gmail.com, kovalevm1tya@yandex.ru, stolyarov_on@spbstu.ru**



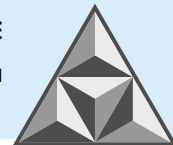
The paper considers the main parameters affecting the mechanical properties and durability of structural elements of textile facades. The authors propose a mathematical model representing a non-linear method for predicting the above parameters. The calculation results allow the creation of a general creep and stress relaxation function for a certain lifetime of the textile facade. The authors conducted creep and stress relaxation research on building enclosures made of textile materials.

Keywords: textile facades, woven materials, nonlinear method, creep prediction, stress relaxation

For citation:

Kherrati Y., Kovalev D.V., Stolyarov O.N. Nonlinear method for predicting creep and stress relaxation of structural elements of textile facades // *Smart Composite in Construction*. 2025. Vol. 6, Iss. 2. P. 22-34. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/6061/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-2-22-34



ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время приобретает популярность использование мягких оболочек в ограждающих строительных конструкциях. Основной причиной является простота их монтажа и невысокая стоимость, по сравнению с таковой для ограждающих конструкций из традиционных строительных материалов. Однако, наряду с активным применением различных напряженных мягких оболочек, для тентовых конструкций зданий характерно существенное отставание нормативной базы, регламентирующей методы их испытаний и способы определения долговечности. Среди действующих документов известны лишь СП 384.1325800.2018 Конструкции строительные тентовые. Правила проектирования. Характерно, что данный документ распространяется только на мягкие напряженные оболочки отрицательной кривизны. В то же время все чаще используются тентовые конструкции с плоскими оболочками.

На рис. 1 показан металлический каркас спортивного комплекса (фото слева) и текстильный фасад (фото справа). Эти ограждающие конструкции могут монтироваться как с предварительным напряжением, так и без него.



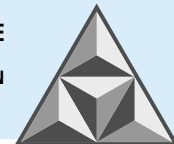
Рис. 1. Металлическая конструкция с текстильным фасадом

Fig. 1. Metal construction with textile facade

В качестве текстильной оболочки используются различные материалы, включая полотна с покрытием специальными эмульсиями. Основными материалами для изготовления полотен являются синтетические (полиэфирные и полиамидные нити), натуральные (хлопок, джут, сизаль и др.) и неорганические (стекловолокно). Наибольшую популярность приобрели текстильные фасады из полиэфирных материалов ввиду их высокой прочности на растяжение и увеличенного срока службы. В качестве защитного покрытия используются поливинилхлорид, политетрафторэтилен и полиуретан. Такая комбинация позволяет получить уникальные строительные конструкции с высокими механическими свойствами (испытание на растяжение) и долговечностью.

В последние два десятилетия многие ученые посвятили свои исследования изучению свойств текстильных фасадов [1-5], а также проблем их старения и оценки жизненного цикла [6-8], вопросам повышения их энергоэффективности [9-13] и разработки экологически чистых конструкций из биопластиков [14].

В [1] акцентируется внимание на свойствах материалов для проектирования напряженных текстильных конструкций. Авторы проводят анализ взаимосвязи между формой и функцией сооружения, показывая, как базовые характеристики материалов влияют на эксплуатационные характеристики конструкции. Подчеркивается, что правильно

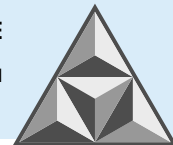


подобранный материал может значительно повысить долговечность и устойчивость сооружения. В [2] исследуется сдвиговое поведение архитектурных тканей при двухосном растяжении; при этом авторы [2] используют экспериментальные и численные методы для анализа деформаций и выявляют ключевые параметры, определяющие устойчивость ткани. В [3] детально исследовано напряженно-деформированное состояние фасадных тканей с покрытием; используются традиционные методы исследований текстильных материалов. В [4] исследованы вязанные полотна под воздействием ветровых нагрузок. Показано, что специально разработанные вязанные структуры способны не только эстетически преобразовать фасад, но и обеспечить определенную степень прочности при динамических нагрузках, создаваемых ветром. Подробно описана экспериментальная методика и проведен анализ, на основании которого становится ясно, каким образом различные режимы нагрузки влияют на деформационное поведение текстиля.

При оценке жизненного цикла текстильных фасадов в отдельных работах [6] рассмотрены проблемы старения материалов и предлагаются методики, позволяющие проектировщикам оценить изменение свойств таких фасадов с течением времени. За основу при разработке методик берутся данные длительных экспериментов, что позволяет сформировать рекомендации по учету эффектов старения при проектировании. Работа подчеркивает важность интеграции механизмов компенсации в расчет прочности материалов. Эти выводы способствуют формированию надежных и долговечных проектов фасадов зданий. Аналогичные рекомендации для анализа жизненного цикла предложены в [7]. В [8] выполнен анализ нагружения и ультрафиолетового облучения, схожий с эксплуатационным режимом, и предложен метод оценки долговечности материалов текстильных конструкций.

Одной из проблем успешного применения таких материалов в качестве ограждающих конструкций зданий и сооружений является увеличенный срок их службы. Согласно СП 384.1325800.2018, определяется надежность материала, с учетом вероятностного разброса прочностных характеристик и коэффициентов, связанных с долговечностью (коэффициент длительной прочности, коэффициент старения материала, коэффициент старения сварных швов). В руководстве по проектированию натяжных мембранных конструкций [15] рассматриваются следующие факторы, влияющие на прочность: длительное нагружение, ультрафиолетовое воздействие и осадки, температура. Ползучесть находится в корреляции с понижающим коэффициентом, который определяется как отношение кратковременной прочности при растяжении к сохраненной прочности после длительного нагружения. Она должна учитываться при необходимом повышении заданного усилия или деформации. Это обеспечивает достижение требуемого номинального уровня предварительного напряжения. Все элементы конструкции текстильного фасада должны быть спроектированы таким образом, чтобы совместно противостоять приложенным напряжениям.

При рассмотрении элементов конструкции текстильного фасада, помимо полиэфирной ткани с покрытием, можно выделить следующие напряженные элементы: стяжки, тросы, веревочные приводы, стропы, стяжки [16, 17]. Указанные элементы должны совместно работать для обеспечения надлежащей эксплуатации конструкции. По своей структуре эти конструктивные элементы могут быть получены путем плетения (например, тросы и веревочные приводы) и ткачества (ограждающие полотна, стропы, стяжки). Последние два элемента из указанных выше представляют собой аналогичное основному материалу тканое переплетение и изготавливаются, как правило, из синтетических нитей; основное отличие заключается в структуре переплетения и размерах. Так, если основные полотна с покрытием испытывают двуосное, то стропы и стяжки – одноосное напряжение. Указанные конструктивные элементы представляют собой синтетические нити, ориентированные в



одном направлении для обеспечения необходимых механических характеристик. В условиях эксплуатации они подвергаются механическим нагрузкам, которые часто изменяются. Поэтому при решении ряда практических задач, связанных с оптимальным предварительным напряжением конструкций и прогнозированием их остаточной прочности, возникает необходимость моделирования длительных процессов деформирования, таких как ползучесть и релаксация напряжения при различных режимах нагружения.

Процессы деформирования должны совпадать с теми, которые испытывает основной материал конструкции. В противном случае несогласованная работа элементов конструкций может привести к появлению нежелательных последствий на основном ограждающем полотне (складки, провисы).

В настоящей работе нами проведено исследование ползучести и релаксации напряжения на узкой тканой ленте полотняного переплетения. Такая структура используется в элементах типа стропы и стяжки.

Ключевая задача заключается в прогнозировании изменений усилий/деформаций во времени для оптимизации нагрузки и расчета срока службы указанных конструкций. Для большинства исследований элементов текстильных фасадов, предшествующих авторским, как правило, характерно упрощенное описание механического поведения и предполагается, что их свойства во времени практически неизменны, что фактически означает игнорирование вязкоупругой природы. В связи с этим в данной работе произведена попытка решить задачу, связанную с учетом фактора времени на деформационное поведение конструктивных элементов текстильных фасадов, что является необходимым для их проектирования и эксплуатации.

Таким образом, цель данной работы формулируется как исследование вязкоупругого поведения текстильного фасада путем проведения экспериментов по изучению ползучести и релаксации напряжения и разработка подходящего метода прогнозирования изменения во времени его физико-механических свойств.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В работе объектом исследования являлась тканая лента полотняного переплетения шириной 25 мм (табл. 1).

Таблица 1. Основные характеристики тканой ленты

Table 1. Main characteristics of woven tape

Характеристика	Соответствие
Материал	Полиамид
Переплетение	Полотняное
Плотность по основе (нити на 10 см)	520
Линейная плотность нитей (текс)	99

Испытания на растяжение, ползучесть и релаксацию напряжения проводили на универсальной измерительной установке. Начальная (зажимная) длина образца составляла 100 мм, скорость растяжения равнялась 20 мм·мин⁻¹. Диаграмма растяжения тканой ленты приведена на рис. 2.

Прочностные характеристики ленты при растяжении:

- прочность при растяжении, Н: 6670±184;
- удлинение при максимальной нагрузке, %: 32.30±0.66.

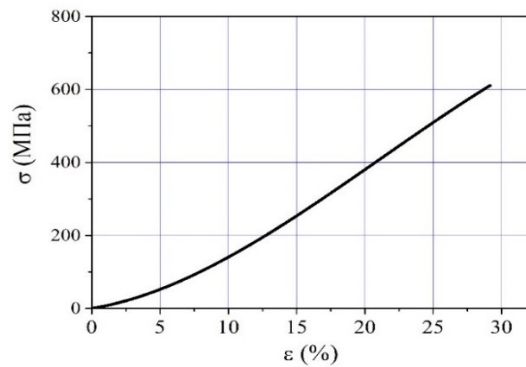
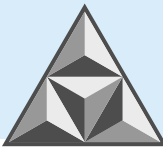


Рис. 2. Диаграмма растяжения тканой ленты

Fig. 2. Tensile diagram of woven tape

Расчет напряжений, возникающих в конструкциях текстильных фасадов, производили по формуле:

$$\sigma = \frac{F \cdot \rho}{n \cdot T} \quad (1)$$

где σ – напряжение МПа;

ρ – удельная плотность вещества нити, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$;

F – растягивающее усилие, Н;

T – линейная плотность нити, текс;

n – количество нитей в поперечном сечении ткани.

Для определения вязкоупругих характеристик тканой ленты проводили испытания на ползучесть и релаксацию напряжений. В первом случае они включали измерение роста деформации при постоянной нагрузке, а во втором – фиксировали снижение напряжения при постоянной деформации.

Процесс ползучести изучали в начальной стадии деформирования при различных уровнях нагрузки, Н (МПа): 200 (17.7); 400 (35.4); 600 (53.1); 800 (70.8); и 1000 (88.6). Образцы растягивали до заданного уровня нагрузки, фиксировали ползучесть в течение 10 мин. Экспериментальные кривые процесса ползучести тканой ленты для различных уровней заданного напряжения представлены на рис. 3, а.

В свою очередь, процесс релаксации напряжения изучали в начальной стадии деформирования образцов при различных уровнях начальной деформации (%): 2; 4; 6; 8; 10. Образцы растягивали при заданном уровне деформации, после чего фиксировали снижение внутренних напряжений в течение 10 мин (600 с).

Экспериментальные кривые, отвечающие процессу релаксации напряжения тканой ленты для различных уровней деформации, представлены на рис. 3, б.

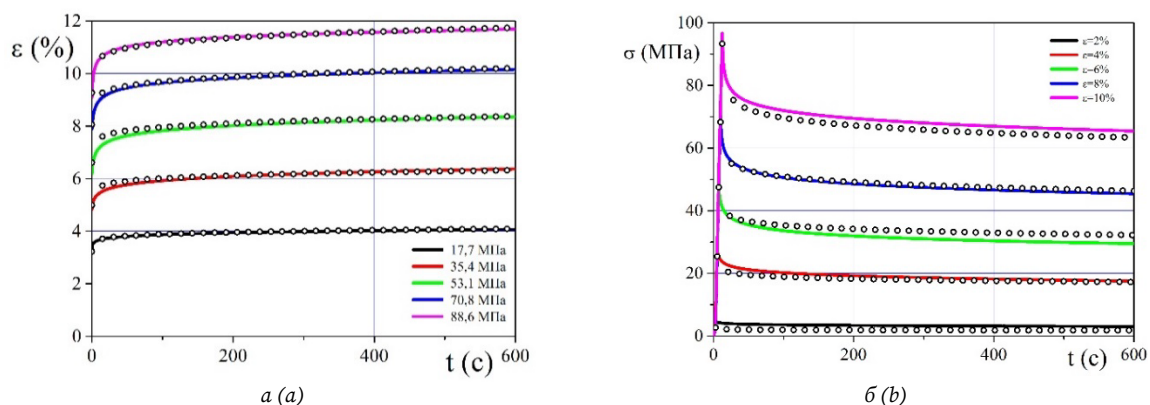
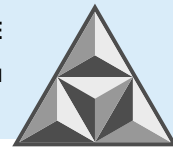


Рис. 3. Кривые ползучести (а) и релаксации (б) тканой ленты

Fig. 3. Creep (a) and relaxation curves (b) of woven tape



РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 4 представлена вязкоупругая модель, используемая для расчетов. Для описания процессов ползучести и релаксации напряжения использовали формулу Прони (Prony) [18]. Ряд Прони представляет собой математическую модель, пригодную для описания зависящего от времени поведения материалов. С помощью данной модели можно описывать вязкоупругое поведение различных полимерных материалов, включая текстиль. Ряд Прони представляет модуль релаксации через сумму экспоненциальных членов затухания. При этом модель включает как упругие (мгновенные), так и вязкие (зависимые от времени) отклики. Используя серию элементов Прони, мы создаем базу для прогнозирования вязкоупругого поведения текстильного элемента при длительном воздействии. Полученные данные могут использоваться для оптимизации конструкций текстильных фасадов.

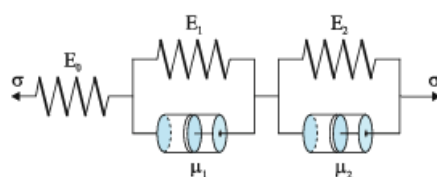


Рис. 4. Модель для описания вязкоупругих свойств текстильного фасада

Fig. 4. A model for describing the viscoelastic properties of a textile facade

Математическая модель, описывающая механическое поведение текстильных материалов – ряд Прони, представлена формулами (2-5).

Для прогнозирования ползучести нами использована формула:

$$D(\sigma, t) = \left(D_{0,10} + D_{1,10} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{1,10}}} \right) + D_{2,10} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{2,10}}} \right) \right) f(\sigma), \quad (2)$$

где D – податливость материала, МПа^{-1} ;

t – время, с.

$$f(\sigma) = b_3 \sigma^3 + b_2 \sigma^2 + b_1 \sigma + b_0, \quad (3)$$

где b_i и $D_{i,10}$ и τ'_i – константы материала.

Для прогнозирования релаксации напряжения использовали формулу:

$$E(\varepsilon, t) = \left(E_{0,10} - E_{1,10} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{1,10}}} \right) - E_{2,10} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{2,10}}} \right) \right) g(\varepsilon), \quad (4)$$

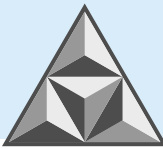
где E – модуль релаксации, МПа ;

при этом

$$g(\varepsilon) = a_3 \varepsilon^3 + a_2 \varepsilon^2 + a_1 \varepsilon + a_0, \quad (5)$$

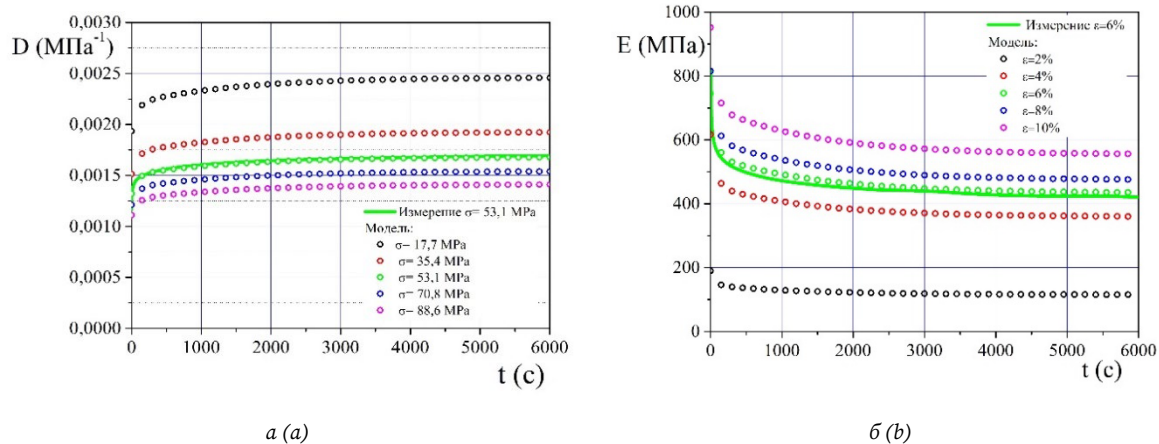
где a и $E_{i,10}$ и τ_i – константы материала (см. табл. 2).

В результате моделирования получены расчетные кривые ползучести и релаксации напряжения для тканой ленты. Данные значения в виде точек дополнительно нанесены на рис. 3, а и 3, б соответственно (для ползучести и релаксации напряжения). Кривые ползучести и релаксации напряжения спрогнозированы нами на один порядок.

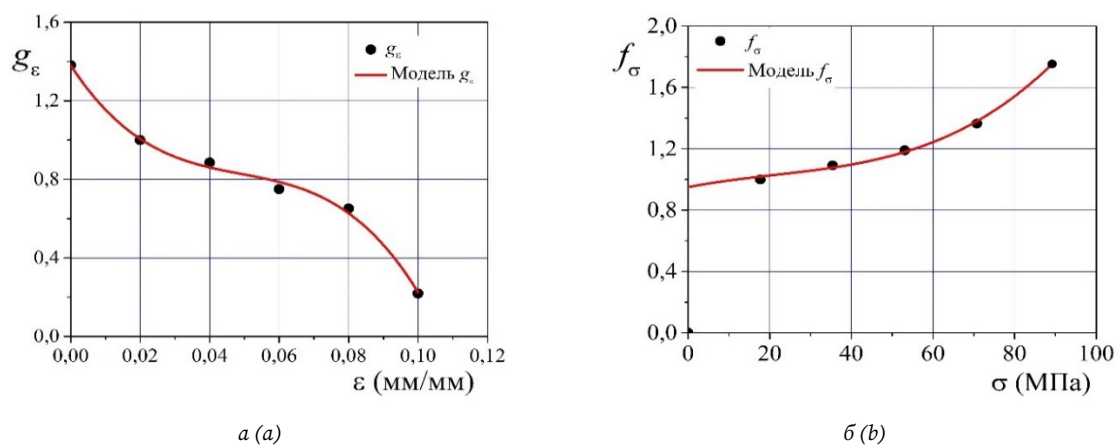
**Таблица 2.** Константы материала для элементов текстильных фасадов**Table 2.** Material constants for textile facade elements

Для ползучести				
$D_{0.10}$ (МПа ⁻¹)	$D_{1.10}$ (МПа ⁻¹)	$D_{2.10}$ (МПа ⁻¹)	τ'_1 (с)	τ'_2 (с)
0.00111	0.00016	0.00015	76.92600	1481.04600
b_3	b_2	b_1	b_0	
1.64E-06	-1.0400E-04	0.0052	0.9500	
Для релаксации напряжения				
$E_{0.10}$ (МПа)	$E_{1.10}$ (МПа)	$E_{2.10}$ (МПа)	τ_1 (с)	τ_2 (с)
871.03	212,154	134.883	66.67	1423.08
a_3	a_2	a_1	a_0	
-3279.1667	483.1964	-27.0894	1.3809	

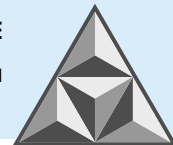
Для подтверждения результатов прогнозирования дополнительно проведены два испытания длительностью 6000 с. Испытание на ползучесть проведено при напряжении в 53.1 МПа. Для релаксации напряжения измерения осуществляли при заданном уровне 6%. На рис. 5 показаны общие функции податливости и релаксирующего модуля для длительности 6000 с.

**Рис. 5.** Прогнозирование ползучести (а) и релаксации напряжения (б) тканой ленты**Fig. 5.** Prediction of creep (a) and relaxation curves (b) of woven tape

Функции f и g определены нами по выражениям (4) и (6). Итоги расчетов представлены на рис. 6.

**Рис. 6.** Прогнозируемая нелинейная функция деформации $g(\varepsilon)$ и напряжения $f(\sigma)$ тканых конструкций**Fig. 6.** Predicted nonlinear strain $g(\varepsilon)$ and stress function of $f(\sigma)$ woven structures

Результаты прогнозирования находятся в хорошей корреляции с экспериментальными кривыми.



Из полученных зависимостей видно, что исследуемый материал изменяет свойства нелинейно – как по деформации, так и по уровню напряжения. Кроме того, материал конструкции демонстрирует изменение характеристик во времени, которое хорошо описывается моделью *Prony*.

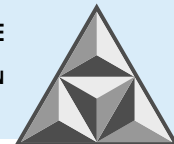
ВЫВОДЫ

Получены расчетные кривые ползучести и релаксации напряжения для исследуемого конструктивного элемента текстильного фасада. Материал конструкции демонстрирует изменение свойств во времени эксплуатации, описываемое моделью *Prony*.

Представленные экспериментальные данные, в сочетании с таблицей констант материала и предлагаемыми методами моделирования, дают ценную информацию для прогнозирования долгосрочного поведения конструкций текстильных фасадов при воздействии внешних факторов, что имеет высокую научную и практическую значимость в контексте их проектирования, обслуживания и повышения устойчивости.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **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.
2. **Colman G., Bridgens B., Gosling P. et al.** Shear behaviour of architectural fabrics subjected to biaxial tensile loads // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2014. Vol. 66. P. 163-174. DOI: 10.1016/j.compositesa.2014.07.015.
3. **Bridgens B., Gosling P.** Direct stress-strain representation for coated woven fabrics // *Computers & Structures*. 2004. № 82 (23-26). P. 1913-1927. DOI: 10.1016/j.compstruc.2003.07.005
4. **Hörteborn E., Zboinska M.** Exploring expressive and functional capacities of knitted textiles exposed to wind influence // *Frontiers of Architectural Research*. 2021. № 10 (3). P. 669-691. DOI: 10.1016/j.foar.2021.02.003
5. **Heinzelmann F., Bristogianni T., Teuffel P.** Functional-layered textiles in architecture // Llorens J. (Ed.). *Fabric Structures in Architecture*. Woodhead Publishing. 2015. P. 159-186. DOI: 10.1016/B978-1-78242-233-4.00005-X
6. **Lilley D., Bridgens B., Davies A., Holstov A.** Ageing (dis)gracefully: Enabling designers to understand material change // *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 220. P. 417-430. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.01.304
7. **Monticelli C., Zanelli A., Campioli A. et al.** Life cycle assessment of textile façades, beyond the current cladding systems // *Proceedings of the TensiNet Symposium*. Istanbul, Turkey. 2013. P. 467-476.
8. **Кущенко Т.В., Бъядовский Д.А., Блинов С.А., Сулейманов А.М.** Расчет долговечности материалов тентовых конструкций с учетом факторов эксплуатации // *Актуальные проблемы военно-научных исследований*. 2019. № 3 (4). С. 283-292.
9. **Bueno B., Wilson H., Sunkara S. et al.** Simulation-based design of an angle-selective and switchable textile shading system // *Building and Environment*. 2020. Vol. 184. Art. 107227. DOI: 10.1016/j.buildenv.2020.107227
10. **Procaccini G., Prieto A., Knaack U. et al.** Textile Membrane for Facade Retrofitting: Exploring Fabric Potentialities for the Development of Innovative Strategies // *Buildings*. 2024. № 14 (1). Art. 86. DOI: 10.3390/buildings14010086
11. **Li Q., Monticelli C., Kutlu A., Zanelli A.** Environmental performance analysis of textile envelope integrated flexible photovoltaic using life cycle assessment approach // *Journal of Building Engineering*. 2024. Vol. 89. Art. 109348. DOI: 10.1016/j.jobe.2024.109348
12. **Srisuwan T.** Fabric Façade: An Intelligent Skin // *International Journal of Building, Urban, Interior and Landscape Technology*. 2017. Vol. 9. P. 7-13. URL: <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/BUILT/article/view/110714> (дата обращения 12.03.2025).
13. **Чесноков А.В., Михайлов В.В.** Каркасно-тентовые конструкции покрытия шедового типа // *Изв. высш. учеб. заведений. Строительство*. 2022. № 5 (761). С. 41-56.



14. **Friedrich D.** How building experts evaluate the sustainability and performance of novel bioplastic-based textile façades: An analysis of decision making // *Building and Environment*. 2022. Vol. 207. Part B. Art. 108485. DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.108485.
15. **Prospect for European Guidance for the Structural Design of Tensile Membrane Structures.** Luxembourg: Publications Office of the European Union. 2023. DOI: 10.2760/94647.
16. **ГОСТ Р 56439-2015.** Комплекты каркасно-тентовых укрытий для спортивных площадок. М.: Стандартинформ, 2015. 24 с.
17. **Удлер Е.М.** Некоторые аспекты тентовой терминологии // *Изв. Казанского гос. арх.-строит. ун-та*. 2017. № 4 (42). С. 196-203.
18. **Sorvari J., Malinen M.** Numerical interconversion between linear viscoelastic material functions with regularization // *International Journal of Solids and Structures*. 2007. №. 44 (3-4). P. 1291-1303. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2006.06.029.

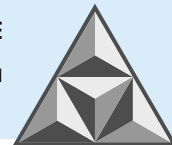
Поступила в редакцию 12.04.2025

Одобрена после рецензирования 29.04.2025

Принята к опубликованию 15.05.2025

REFERENCES

1. **Bridgens, B.N. and Birchall, M.** (2012), "Form and function: The significance of material properties in the design of tensile fabric structures", *Engineering Structures*, vol. 44, pp. 1-12.
2. **Colman, G., Bridgens, B.N., Gosling, P.D. et al.** (2014), "Shear behaviour of architectural fabrics subjected to biaxial tensile loads", *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 66, pp. 163-174. DOI: 10.1016/j.compositesa.2014.07.015
3. **Bridgens, B.N. and Gosling, P.D.** (2004), "Direct stress-strain representation for coated woven fabrics", *Computers & Structures*, vol. 82, no. 23-26, pp. 1913-1927. DOI: 10.1016/j.compstruc.2003.07.005
4. **Hörteborn, E. and Zboinska, M.A.** (2021), "Exploring expressive and functional capacities of knitted textiles exposed to wind influence", *Frontiers of Architectural Research*, vol. 10, no. 3, pp. 669-691. DOI: 10.1016/j.foar.2021.02.003
5. **Heinzelmann, F., Bristogianni, T. and Teuffel, P.** (2015), "Functional-layered textiles in architecture", in Llorens, J.I. (Ed.), *Fabric Structures in Architecture*, Woodhead Publishing, pp. 159-186. DOI: 10.1016/B978-1-78242-233-4.00005-X
6. **Lilley, D., Bridgens, B., Davies, A. and Holstov, A.** (2019), "Ageing (dis)gracefully: Enabling designers to understand material change", *Journal of Cleaner Production*, vol. 220, pp. 417-430. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.01.304
7. **Monticelli, C., Zanelli, A., Campioli, A., et al.** (2013), "Life cycle assessment of textile façades, beyond the current cladding systems", *Proceedings of the TensiNet Symposium, Istanbul, Turkey*, pp. 467-476.
8. **Kutsenko, T.V., Byadovsky, D.A., Blinov, S.A., Sulejmanov, A.M.** (2019), "Durability assessment of tent materials considering operational factors", *Current Issues in Military Science Research*, vol. 3, no. 4, pp. 283-292 (in Russian).
9. **Bueno, B., Wilson, H.R., Sunkara, S., Sepúlveda, A. and Kuhn, T.E.** (2020), "Simulation-based design of an angle-selective and switchable textile shading system", *Building and Environment*, vol. 184, art. 107227. DOI: 10.1016/j.buildenv.2020.107227
10. **Procaccini, G., Prieto, A., Knaack, U., Monticelli, C. and Konstantinou, T.** (2024), "Textile Membrane for Façade Retrofitting: Exploring Fabric Potentialities for the Development of Innovative Strategies", *Buildings*, vol. 14, no. 1, art. 86. DOI: 10.3390/buildings14010086
11. **Li, Q., Monticelli, C., Kutlu, A. and Zanelli, A.** (2024), "Environmental performance analysis of textile envelope integrated flexible photovoltaic using life cycle assessment approach", *Journal of Building Engineering*, vol. 89, art. 109348. DOI: 10.1016/j.job.2024.109348
12. **Srisuwan, T.** (2017), "Fabric Facade: An Intelligent Skin", *International Journal of Building, Urban, Interior and Landscape Technology*, vol. 9, pp. 7-13. Available at: <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/BUILT/article/view/110714> (accessed 12.03.2025).



13. **Chesnokov, A.V. and Mikhailov, V.V.** (2022), "Frame-tent structures of shed-type coverings", *News of Higher Educational Institutions. Construction*, vol. 5, no. 761, pp. 41-56 (in Russian).
14. **Friedrich, D.** (2022), "How building experts evaluate the sustainability and performance of novel bioplastic-based textile façades: An analysis of decision making", *Building and Environment*, vol. 207, part B, art. 108485. DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.108485
15. **Prospect for European Guidance for the Structural Design of Tensile Membrane Structures** (2023), Publications Office of the European Union, Luxembourg. DOI: 10.2760/94647
16. GOST R 56439-2015 (2015) "Frame-tent shelter kits for sports grounds", Moscow: Standartinform, 24 p. (in Russian).
17. **Udler, E.M.** (2017), "Some aspects of tent terminology", *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*, vol. 4, no. 42, pp. 196-203 (in Russian).
18. **Sorvari, J. and Malinen, M.** (2007), "Numerical interconversion between linear viscoelastic material functions with regularization", *International Journal of Solids and Structures*, vol. 44, no. 3-4, pp. 1291-1303. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2006.06.029

Received 12.04.2025

Approved 29.04.2025

Accepted 15.05.2025