

СТРОИТЕЛЬСТВО

CONSTRUCTION

Оригинальная статья / Original article

УДК 624.072.21

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-3-37-55>



Оптимизированная консольная конструкция с применением текстильно-армированного бетона для климатических условий юга России

Н.О. Борисов¹ О.Н. Столяров¹

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
ул. Политехническая, д. 29, г. Санкт-Петербург 195251, Российская Федерация

e-mail: borisov.n@edu.spbstu.ru

Резюме

Цель исследования. Целью данного исследования является анализ конструктивных возможностей и ограничений применения текстильно-армированного бетона (ТАБ) в кровельных системах спортивных сооружений, с особым вниманием к консольной конструкции крыши стадиона, адаптированной под климатические условия Сочи.

Методы. В исследовании используется расчетная модель консольной кровельной конструкции, выполненной из ТАБ, с геометрией консольного выноса 22,735 м и общей шириной 84,4 м. Для анализа применяются численные методы с использованием конечно-элементной модели в ANSYS. Рассматриваются нагрузки, включая снеговые и ветровые, с соответствующими нормативами для Сочи. В ходе расчётов исследуются различные варианты толщины покрытия и длины консольного выноса.

Результаты. Результаты расчётов показывают, что применение ТАБ значительно улучшает жесткость конструкции, снижая вертикальные перемещения консоли на 30–35% по сравнению с традиционным армоконкретом. Также, при уменьшении толщины покрытия до 200 мм, сохраняется достаточная жесткость конструкции, что позволяет уменьшить материалоёмкость. В результате удлинение консольного выноса на 3–4 м возможно без превышения предельных значений прогибов.

Заключение. Исследование показало, что использование ТАБ для кровельных конструкций спортивных сооружений позволяет добиться значительных улучшений в жесткости и материалоёмкости, обеспечивая возможность увеличения пролётов или сокращения толщины покрытия без потери эксплуатационных характеристик. Это открывает новые возможности для проектирования лёгких и эффективных конструкций в условиях южных регионов России.

Ключевые слова: текстильно-армированный бетон; консольная конструкция; кровельные системы; прогиб консоли; материалоёмкость.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

© Борисов Н.О., Столяров О.Н., 2025

Известия Юго-Западного государственного университета / Proceedings of the Southwest State University. 2025; 29(3): 37-55

Для цитирования: Борисов Н.О., Столяров О.Н. Оптимизированная консольная конструкция с применением текстильно-армированного бетона для климатических условий юга России // Известия Юго-Западного государственного университета. 2025; 29(3): 37-55. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-3-37-55>.

Поступила в редакцию 22.05.2025

Подписана в печать 15.07.2025

Опубликована 30.09.2025

Optimized cantilever structure using textile-reinforced concrete for the climatic conditions of southern Russia

Nikita O. Borisov¹ , Oleg N. Stolyarov¹

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29, Polytechnicheskaya str., St. Petersburg 195251, Russian Federation

 e-mail: borisov.n@edu.spbstu.ru

Abstract

Purpose of research. The aim of this study is to analyze the structural capabilities and limitations of using textile-reinforced concrete (TRC) in roofing systems for sports facilities, with particular focus on a stadium roof cantilever structure designed for the climatic conditions of Sochi.

Methods. The study uses a computational model of a cantilever roofing structure made of TRC, with a cantilever length of 22.735 m and a total width of 84.4 m. Numerical methods with finite element modeling in ANSYS are employed. Loads, including snow and wind, are applied based on the regulatory standards for Sochi. Different scenarios of cover thickness and cantilever length variations are analyzed.

Results. The results show that TRC significantly enhances the stiffness of the structure, reducing vertical displacements of the cantilever by 30-35% compared to traditional reinforced cement. Furthermore, reducing the cover thickness to 200 mm maintains sufficient stiffness, leading to material savings. Extending the cantilever by 3-4 meters is feasible without exceeding the allowable deflection limits.

Conclusion. The study demonstrates that the use of TRC in roofing structures for sports facilities leads to significant improvements in stiffness and material efficiency, allowing for either increased spans or reduced cover thickness without compromising performance. This presents new opportunities for the design of lightweight and efficient structures in the southern regions of Russia.

Keywords: textile-reinforced concrete; cantilever structure; roofing systems; console deflection; material efficiency.

Conflict of interest. The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Borisov N. O., Stolyarov O. N. Optimized cantilever structure using textile-reinforced concrete for the climatic conditions of southern Russia. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2025; 29(3): 37-55 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-3-37-55>.

Received 22.05.2025

Accepted 15.07.2025

Published 30.09.2025

Введение

Текстильно-армированный бетон (ТАБ) продолжает привлекать внимание исследователей благодаря своей легкости, вы-

сокой прочности и устойчивости к агрессивным воздействиям. Его использование позволяет значительно улучшить сейсмическую устойчивость конструк-

ций, как показали эксперименты с кирпичными стенами [1]. Применение инновационных методов производства, таких как экструзия с решетчатыми структурами, позволяет существенно сократить массу конструкций [2]. ТАБ эффективно улучшает несущую способность кирпичных конструкций, увеличивая их жесткость и сопротивление нагрузкам [3]. В исследованиях колонн установлено, что увеличение количества слоев текстильной арматуры значительно повышает их прочность и деформационную устойчивость [4]. В условиях сложных нагрузок, таких как растяжение и изгиб, материал сохраняет свою конструктивную целостность [5].

Численные модели показывают, что взаимодействие между текстилем и бетонной матрицей играет ключевую роль в передаче напряжений [6]. Исследования композитных балок подтверждают, что использование ТАБ позволяет повысить гибкость и прочность конструкций [7]. Анализ поверхности между слоями бетона и арматуры также выявляет возможности повышения несущей способности [8]. Особое внимание уделяется устойчивости ТАБ к огневым воздействиям и термомеханическим нагрузкам, что критично для обеспечения безопасности конструкций [9]. Экспериментальные исследования показывают эффективность материала при высокоскоростных ударных воздействиях [10]. ТАБ активно применяется для спортивных сооружений благодаря своей способности уменьшить массу конструкций и улуч-

шить их долговечность [11]. Применение углеродных и базальтовых текстильных сеток позволяет улучшить механические свойства и снизить риск разрушений [12, 13].

Численные исследования показывают, что ТАБ сохраняет прочность даже при значительном удлинении консольных элементов [14]. Оптимизация формы и толщины текстильной арматуры позволяет добиться высоких прочностных характеристик [2, 15]. Исследования огибающих конструкций и адаптивных систем на основе текстильных материалов подтверждают их потенциал для архитектурных решений [16]. Применение ТАБ также актуально для временных и сборных конструкций [17]. Особое внимание уделяется анализу вибрационных характеристик конструкций и разработке методов их демпфирования [18]. Численные методы продолжают играть важную роль в моделировании конструкций, что позволяет проводить оптимизацию формы и минимизировать массу [19]. Влияние текстильной арматуры на характеристики сцепления и сопротивления разрушению остается важной темой исследований [20]. Кроме того, развитие многослойных конструкций на основе ТАБ позволяет достичь новых уровней прочности и гибкости [21].

Оптимизация параметров текстильной арматуры и анализ различных моделей взаимодействия с бетонной матрицей открывают возможности для проектирования более эффективных конструкций

[22, 23]. Анализ огибающих структур подтверждает их устойчивость при различных нагрузках [24]. Влияние толщины армирующих слоев на прочностные характеристики также остается актуальным направлением исследований [8]. Исследования показывают, что ТАБ обеспечивает высокую устойчивость к изгибным и растягивающим воздействиям [10, 25]. Численные и экспериментальные модели подтверждают его эффективность при проектировании сложных конструктивных систем [26, 27]. ТАБ также демонстрирует устойчивость к динамическим воздействиям и вибрациям, что особенно важно для временных и сборных конструкций [28, 29]. Анализ испытаний [30] уменьшенных прототипов консольного навеса с применением ТАБ показывает верность применяемых конечноэлементных моделей и позволяет перейти к расчётам полноценной конструкции.

Цель исследования: анализ конструктивных возможностей и ограничений применения текстильно-армированного бетона (ТАБ) в кровельных системах спортивных сооружений на примере консольной конструкции крыши стадиона для климатических условий Сочи.

Задачи:

1. Сбор и анализ нагрузок для климатических условий Сочи.
2. Определение возможности сокращения толщины покрытия на основе увеличенной прочности ТАБ по сравнению с армоцементными конструкциями.

3. Анализ конструктивной устойчивости при удлинении выноса консоли с шаговой вариацией длины.

4. Построение графической зависимости прогиба от длины консоли для выявления предельных состояний.

5. Оценка возможности сокращения материала или увеличения покрытия козырька без снижения эксплуатационной надежности конструкции.

Объект исследования: консольная кровля стадиона, выполненная из текстильно-армированного бетона.

Предмет исследования: конструктивные параметры и эксплуатационные характеристики кровли при изменении толщины покрытия и длины выноса консоли.

Актуальность: применение текстильно-армированного бетона открывает новые перспективы для проектирования лёгких и устойчивых конструкций кровель спортивных сооружений. Его высокая прочность и устойчивость к агрессивным средам позволяет снизить материалоёмкость и увеличить площадь покрытия. Данное исследование направлено на поиск наиболее эффективных решений для консольных кровельных конструкций с учётом климатических особенностей южных регионов России.

Материалы и методы

Расчётная модель представляет собой консольную кровельную конструкцию козырька стадиона из текстильно-армированного бетона (ТАБ). Основная геометрия кровли включает длину консольного выноса 22,735 м, общую ши-

рину 84,4 м, разделённую на 16 равных пролётов, а также первоначальную толщину покрытия 300 мм. Конструкция имеет изогнутую форму с усреднённым углом наклона 15°. Жесткость конструкции обеспечивается 17 консольными балками, размещенными между пролётами и работающими совместно с плитой покрытия. Борта и кромки отсутствуют, проектирование носит схематичный характер.

В модели учитывается совместная работа плиты и балок в рамках конечно-элементной схемы, однако жесткое соединение между ними не моделируется – узлы сопряжения не разрабатывались, что обосновано общей концепцией пред-

варительного инженерного анализа и допущением о распределенной совместной работе. Модель имеет симметричную конфигурацию, и на её прикладываются равномерно распределенные нагрузки. Конструкция закреплена жестко с одного конца, противоположный край остаётся свободным – классическая консольная схема.

Расчёты выполняются для варианта конструкции из текстильно-армированного бетона, с сопоставлением результатов с параметрами армоцементной кровли (ферроцемент), принятой как исходный прототип. Используются физико-механические характеристики, представленные в табл. 1.

Таблица 1. Физико-механические характеристики бетонов, принимаемые при расчёте

Table 1. Physical and mechanical characteristics of concrete considered during the calculation

Параметр / Parameter	Армоцемент (исходный вариант) / Reinforced cement (original version)	ТАБ (расчётный вариант) / TRC (calculated version)
Модуль упругости, Е, ГПа	25	35
Средняя плотность, ρ, кг/м ³	2600	2300
Коэффициент Пуассона, ν	0,2	0,2
Прочность на растяжение, МПа	2,5	3,0

В качестве армирующего материала используется сетка из щелочестойкого стекловолокна. Моделирование повреждений и трещинообразования в расчётной модели не проводится, что обусловлено предварительным инженерным характером анализа и отсутствием необходимости в детальной микромеханике разрушения.

Модель реализована в ANSYS, расчёт выполняется в линейной постановке, статический анализ, геометрическая нелинейность не учитывается. Тип конечно-элементов – трёхмерные тетраэдрические объемные элементы. Данный тип элементов обеспечивает возможность корректного описания пространственной геометрии и распределен-

ния напряжений внутри плиты и балок. При расчетах контролируются значения продольных растягивающих напряже-

ний (рис. 1), а также перемещение свободного конца консоли (рис. 2).

Учтённые в расчётной модели виды нагрузок представлены в табл. 2.

Таблица 2. Виды нагрузок

Table 2. Types of loads

Тип нагрузки / Type of loads	Параметр / Parameter	Значение / Value
Снеговая нагрузка	Снеговой район	II
	Нормативная нагрузка, кПа	1,0
Ветровая нагрузка	Ветровой район	III
	Нормативное давление, кПа	0,38
	Коэффициент формы	1,3–2,0
Собств. Вес	Текстильно-армированный бетон, т/м ³	2,3
Доп. Нагрузки	Временные технологические нагрузки, кПа	0,2–0,3

Полная формула для расчета суммарной нагрузки:

$$q_{total} = q_{dead} + q_{snow} \psi_1 + \dots + q_{wind} \psi_2 + q_t \psi_3, \quad (1)$$

где q_{dead} – собственный вес конструкции;

q_{snow} – снеговая нагрузка;

q_{wind} – ветровая нагрузка;

q_t – временные технологические нагрузки (0,3 кПа);

ψ_1, ψ_2, ψ_3 – коэффициенты сочетания (обычно $\psi \in [0,7;1,0]$, по СП).

Основные комбинации нагрузок (СП 20.13330.2016):

1. Основные сочетания:

1.1. Постоянная нагрузка + длительная:

$$q_{total} = q_{dead} + q_{snow}. \quad (2)$$

1.2. Постоянная нагрузка + кратковременная:

$$q_{total} = q_{dead} + q_{wind} + q_t. \quad (3)$$

2. Комбинированное сочетание:

2.1. Постоянная + снег + ветер:

$$q_{total} = q_{dead} + q_{snow} \cdot 0,95 + \dots + q_{wind} + q_t \cdot 0,9. \quad (4)$$

Расчет ветровой нагрузки:

$$q_{wind} = C k(z_e) q_0, \quad (5)$$

где C – аэродинамический коэффициент (0,25–1,6 для навесов с углом наклона 15° в зависимости от направления ветра);

$k(z_e)$ – коэффициент, учитывающий изменение в зависимости от высоты ветрового давления (0,5–0,85 для городской территории, высота от 0 до 20 м);

q_0 – нормативное значение давления ветра (0,38 кПа для Сочи).

Модель используется для выполнения двух серий параметрических расчётов:

1. Уменьшение толщины покрытия – от исходных 300 мм с шагом 50 мм, с целью определения тренда и анализа

возможной материалоемкости и несущей способности конструкции при использовании ТАБ.

2. Удлинение выноса консоли – с шагом 1 м, до момента превышения допустимого вертикального перемещения свободного конца консоли.

Для каждого расчёта фиксируются:

- максимальные вертикальные перемещения конца консоли;

– возникающие напряжения в зоне растяжения (сравнение с пределом в 3,0 МПа);

– расчет эквивалентного распределённого давления, приводящего к тем же прогибам, что и комплексное нагружение, для построения графика зависимости деформации от прикладываемой нагрузки.

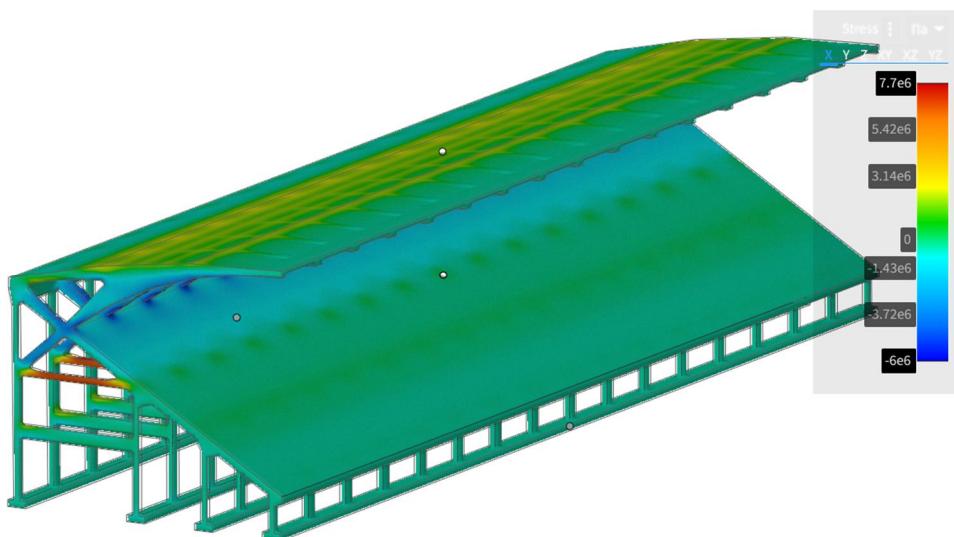


Рис. 1. Модель рассчитываемого покрытия в комплексе ANSYS с отображением распределения напряжений по направлению вдоль консольной конструкции кровли

Fig. 1. Model of the calculated coating in the ANSYS complex with display of stress distribution in the direction along the cantilever roof structure

В целях сопоставимости различных расчётных сценариев нагрузки, возникающие от сочетания постоянных, длительных и кратковременных воздействий были приведены к эквивалентной равномерно распределённой нагрузке. Под эквивалентной нагрузкой в данном случае понимается такое условное распределённое давление по поверхности покрытия, которое вызывает в расчётной модели те же максимальные вертикаль-

ные перемещения (прогибы), что и реальные расчётные сочетания нагрузок. Это позволяет унифицировать подход к анализу и построить обобщённые зависимости деформативности конструкции от геометрических параметров.

Для исходной конструкции из армоконкрета (толщина покрытия 300 мм, длина консольного выноса 22,735 м) получены значения, представленные в табл. 3.

Данные расчёты используются в дальнейшем в качестве референтных значений для анализа конструкций с применением

текстильно-армированного бетона (ТАБ), с различной толщиной покрытия и удлинённым выносом консоли.

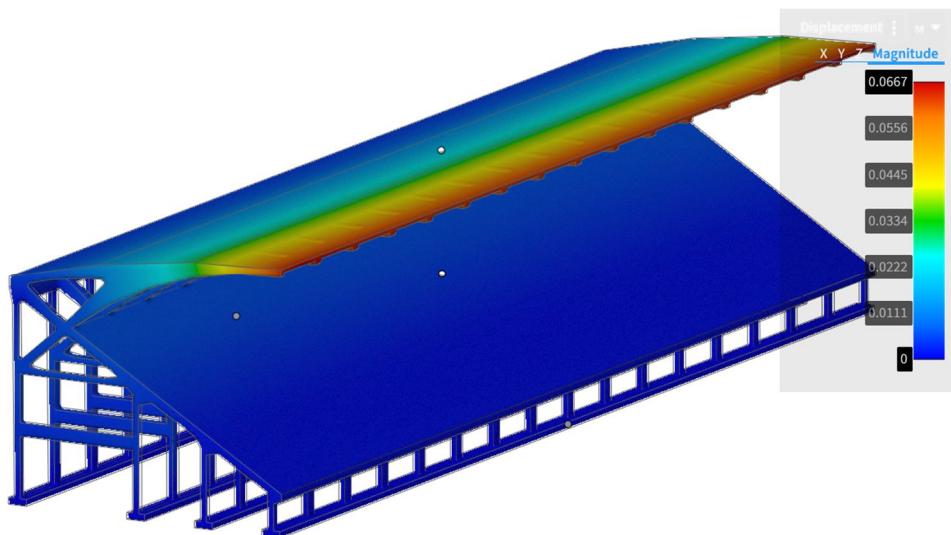


Рис. 2. Модель рассчитываемого покрытия в комплексе ANSYS с отображением распределения вертикальных перемещений

Fig. 2. Model of the calculated coating in the ANSYS complex with display of the distribution of vertical displacements

Таблица 3. Результаты расчёта исходной конструкции

Table 3. Results of calculation of the initial version

Тип загружения / Load type	Эквивалентная нагрузка (МН) / Equivalent load (MN)	Прогиб (мм) / Deflection (mm)
Постоянные и длительные нагрузки	23,79	147,00
Постоянные и кратковременные нагрузки	22,32	138,60
Комбинированная нагрузка	24,37	150,60

Первым этапом анализа стала оценка влияния замены материала конструкции на ТАБ при неизменной геометрии. Результаты, представленные в табл. 4, показали значительное снижение вертикальных перемещений.

Таким образом, даже без изменения толщины покрытия, жесткость конструкции существенно возрастает, позволяя в

далнейшем рассматривать либо снижение материоёмкости, либо увеличение пролётов без ухудшения эксплуатационных характеристик.

На следующем этапе исследовалась возможность увеличения длины консольного выноса при сохранении толщины покрытия 300 мм (ТАБ). Результаты расчётов представлены в табл. 5.

Таблица 4. Сравнение результатов расчетов исходной армоцементной конструкции и варианта с применением текстильно-армированного бетона**Table 4.** Comparison of calculation results for the original reinforced cement structure and the version using textile-reinforced concrete

Тип загружения / Load type	Эквивалентная нагрузка (МН) / Equivalent load (MN)	Прогиб ТАБ (мм) / Deflection TRC (mm)	Прогиб армоце- мент (мм) / Deflection rein- forced cement (mm)	Разница / Difference (%)
Постоянные и дли- тельные нагрузки	21,20	98,55	147,00	-32,9%
Постоянные и кратковременные нагрузки	19,76	92,25	138,60	-33,5%
Комбинированная нагрузка	21,78	101,25	150,60	-32,8%

Таблица 5. Анализ результатов расчётов консольной конструкции при увеличении длины выноса**Table 5.** Analysis of the calculation results of the cantilever structure with an increase in the extension length

Длина консоли (м) / Console length (m)	Экв. нагрузка (МН) / Equivalent load (MN)	Прогиб (мм) / Deflection (mm)	Предел, мм / Limit, mm	Превышение предела / Exceeding limit
22,735	21,78	101,25	181,88	[]
23,735	22,18	132,75	189,88	[]
24,735	22,28	167,85	197,88	[]
25,735	22,59	208,35	205,88	[X]
26,735	22,63	269,55	213,88	[X]

Как видно, допустимая граница прогиба по предельному состоянию ($2L/250$) начинает превышаться уже при выносе более 25,5–26 м (рис. 3), что определяет предельно допустимую длину консольного выноса конструкции с текущей толщиной покрытия.

Таким образом, при использовании ТАБ возможно увеличить длину консо-

ли L на 3–4 метра по сравнению с исходной системой, без выхода за предельно допустимые значения деформаций $f_U = 2L/250$.

Была также проведена серия расчетов при последовательном уменьшении толщины покрытия до 250 мм и 200 мм при фиксированной длине консоли 22,735 м. Результаты представлены в табл. 6.

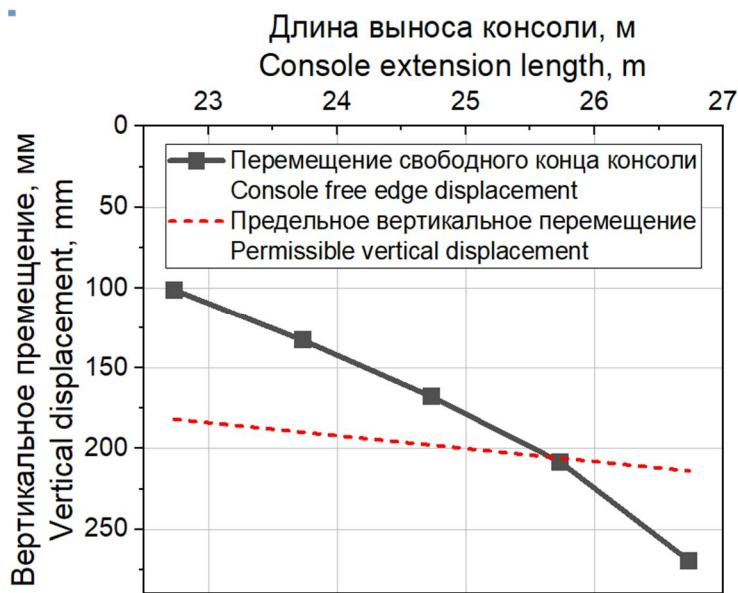


Рис. 3. Прогиб свободного конца консоли при увеличении длины выноса

Fig. 3. Deflection of the console free end with an increase in the extension length

Таблица 6. Результаты расчётов консольной конструкции при уменьшении толщины покрытия

Table 6. Results of cantilever structure calculations with a decrease in the coating thickness

Толщина покрытия (мм) / Coating thickness (mm)	Экв. нагрузка (МН) / Equivalent load (MN)	Прогиб (мм) / Deflection (mm)
300	21,78	101,25
250	19,09	96,30
200	15,16	86,85

Основным результатом стало снижение как нагрузки, так и прогиба при уменьшении толщины. Основная причина – уменьшение собственного веса покрытия, который в рассматриваемой схеме составляет значительную долю от общей нагрузки. Таким образом, жёсткость конструкции остаётся достаточной, а снижение толщины приводит к снижению деформаций. Это подтверждает, что в условиях высокой прочности ТАБ, толщина покрытия определяется в первую очередь не прочностными сооб-

ражениями, а требованиями к долговечности, эксплуатации и защитным слоям.

Результаты и их обсуждение

Полученные расчётные данные позволяют провести комплексное сравнение различных вариантов конструктивной реализации кровельной системы: на основе традиционного армокемента и современного текстильно-армированного бетона (ТАБ). Результаты анализа продемонстрировали преимущества ТАБ как с точки зрения деформативности, так и потенци-

альной возможности уменьшения материоемкости конструкции или увеличения покрытия консоли.

На рис. 4 представлена зависимость эквивалентной нагрузки от прогиба свободного конца консоли при увеличении длины выноса. Для сопоставления на графике также показаны результаты

расчётов для армоцемента и исходной конструкции из ТАБ.

Из графика (рис. 4) видно, что при одинаковом уровне прогибов на конструкцию из армоцемента воздействует существенно большая эквивалентная нагрузка, что отражает более низкую жёсткость материала.

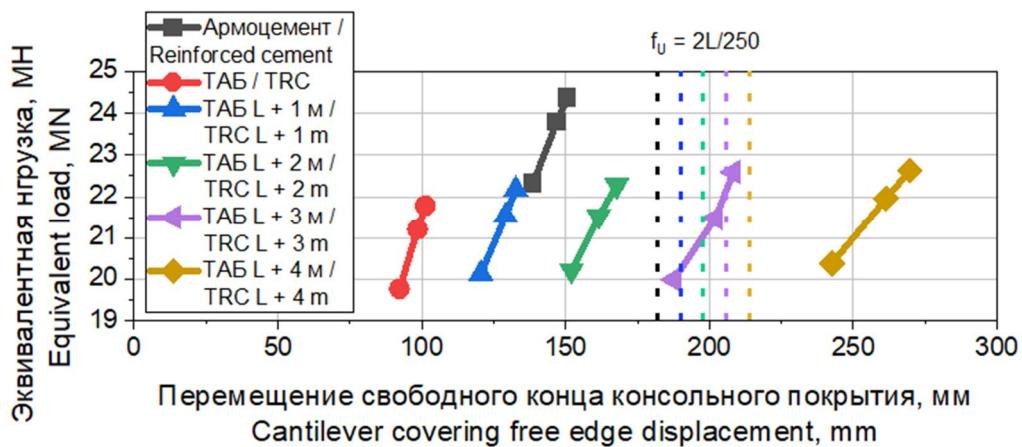


Рис. 4. Зависимость эквивалентной вертикальной силы от перемещения края консольной конструкции при удлинении выноса консоли

Fig. 4. Dependence of the equivalent vertical force on the displacement of the cantilever structure edge with an increase in the cantilever overhang

В то же время конструкция из ТАБ способна выдерживать аналогичное воздействие с меньшим прогибом либо допускать увеличение длины выноса без превышения предельных деформаций. Граница допустимого прогиба по условию $2L/250$ обозначена на графике пунктирной линией. Видно, что при длине консоли более 25,7 м (удлинение на 3 м или на 13%) происходит её пересечение.

Таким образом, ТАБ обеспечивает возможность увеличения покрытия без ущерба для эксплуатационной надёжности, что критически важно в архитектуре крупных спортивных и общественных объектов.

На рис. 5 приведена зависимость эквивалентной нагрузки от прогиба при поэтапном снижении толщины покрытия. Аналогично первому случаю, результаты армоцементной конструкции включены для сравнения.

Характерной особенностью здесь является то, что при снижении толщины покрытия наблюдается не увеличение, а наоборот, уменьшение прогиба. Анализ показывает, что это вызвано уменьшением собственного веса покрытия, составляющего основную часть общей нагрузки при заданных геометрических параметрах.

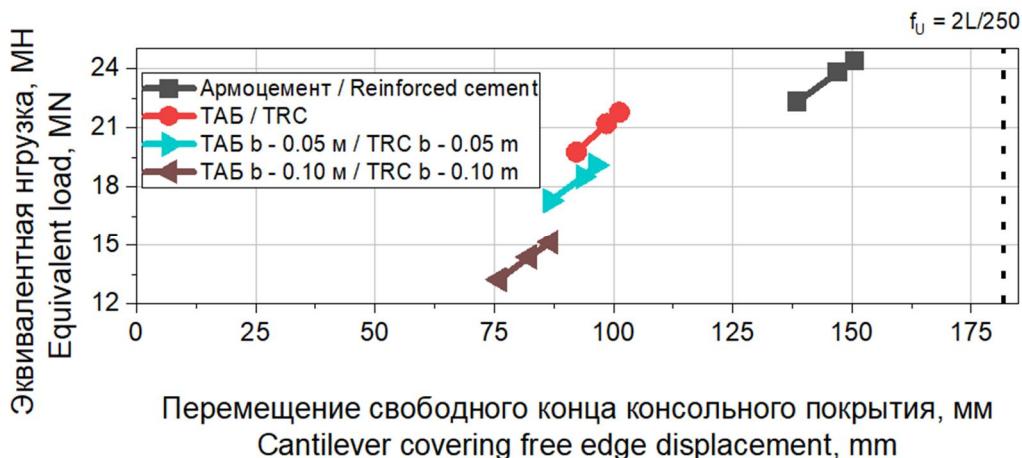


Рис. 5. Зависимость эквивалентной вертикальной силы от перемещения края консольной конструкции при уменьшении поперечного сечения

Fig. 5. Dependence of the equivalent vertical force on the displacement of the cantilever structure edge with a decrease in the cross-section thickness

Таким образом, в рассматриваемой схеме толщина покрытия при использовании ТАБ определяется не предельными состояниями по деформациям или прочности, а скорее требованиями к защитным слоям, долговечности или конструктивной технологии. Это открывает возможности для существенного снижения материалоемкости конструкции без ущерба её несущей способности.

Сравнение вариантов показало, что применение ТАБ приводит к снижению вертикальных перемещений на 30–35% при тех же габаритах, либо позволяет увеличить длину консоли до 3–4 м, оставаясь в пределах допустимых прогибов. При этом эквивалентные нагрузки для достижения аналогичных деформаций существенно ниже, чем в армоцементной конструкции.

Таким образом, ТАБ даёт проектировщику возможность гибкого выбора: либо снижать массу и толщину кон-

струкции, либо увеличивать пролёт при сохранении эксплуатационных характеристик. Это делает материал особенно перспективным для архитектурных решений с большими выносами, изгибами и высокими требованиями к визуальной лёгкости.

Выводы

Проведённое исследование позволило всесторонне оценить конструктивные возможности применения текстильно-армированного бетона (ТАБ) в кровельных системах спортивных сооружений на примере консольной конструкции стадиона, адаптированной под климатические условия Сочи.

На первом этапе был выполнен сбор и анализ нагрузок, характерных для южных регионов России. Установлено, что при расчётах необходимо учитывать снеговые и ветровые воздействия, соответствующие II снеговому и III ветро-

вому районам. Эти данные были приведены к эквивалентной равномерно распределённой нагрузке, что позволило унифицировать подход к моделированию и обеспечить сопоставимость различных сценариев.

Вторым направлением анализа стало определение оптимальной толщины покрытия с учётом повышенной жёсткости и прочности ТАБ по сравнению с армоцементом. Расчёты показали, что даже при толщине 300 мм прогиб конструкции из ТАБ снижается на 30–35% по сравнению с аналогичной конструкцией из армоцемента. Дополнительный анализ показал, что при уменьшении толщины покрытия до 250 мм и даже 200 мм конструкция остаётся в пределах нормативных требований по деформациям. Более того, снижение толщины приводит к уменьшению собственного веса и, как следствие, снижению прогибов, что позволяет оптимизировать конструкцию с точки зрения материоёмкости без ущерба для её эксплуатационной надёжности.

В рамках третьей задачи была проанализирована возможность удлинения консольного выноса. Моделирование показало, что при использовании ТАБ допустимая длина консоли может быть увеличена на 3–4 метра по сравнению с исходной схемой без превышения предельных вертикальных перемещений. При длине выноса до 25,7 м конструкция остаётся в пределах нормативного предела прогиба $f_U = 2L/250$, что свидетельствует о высоком потенциале ТАБ для создания протяжённых, но при этом жёстких кровельных элементов.

Для выявления предельных состояний и анализа эффективности конструктивных решений были построены графические зависимости прогиба и эквивалентной нагрузки от длины выноса и толщины покрытия. На графиках чётко прослеживается тенденция ускоренного роста деформаций при приближении к предельной длине консоли, а также эффект снижения нагрузки при уменьшении толщины покрытия. Это подчёркивает высокую чувствительность консольных конструкций к изменениям геометрии, а также демонстрирует эффективность применения эквивалентной нагрузки в расчётной модели.

Заключительным результатом исследования стала комплексная оценка проектного потенциала ТАБ. Показано, что использование данного материала открывает две стратегические возможности: либо существенное снижение толщины покрытия с уменьшением собственного веса и материоёмкости, либо увеличение длины консольного выноса при сохранении нормативной надёжности конструкции. Это делает ТАБ высокоэффективным решением для современного архитектурного проектирования лёгких, визуально прозрачных и технологичных кровель спортивных сооружений, особенно в условиях климатических нагрузок южных регионов.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на изучение долговечности ТАБ в агрессивных климатических условиях, разработку методов

оценки его качества в процессе эксплуатации, а также исследование воздействия динамических нагрузок, таких как землетрясения или сильные ветры, на

конструкции. Кроме того, стоит рассмотреть оптимизацию производства ТАБ для снижения его стоимости и расширения областей применения.

Список литературы

1. Effects of textile-reinforced concrete on the cyclic shear behavior of damaged confined brick masonry walls / F. Qu, S. Yin, F. Wang, B. Wang // Journal of Building Engineering. 2023. Vol. 78. P. 107717. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107717>.
2. Fabrication of lightweight, carbon textile reinforced concrete components with internally nested lattice structure using 2-layer extrusion by LabMorTex / M. Kalthoff [et al.] // Constr Build Mater. 2023. Vol. 395. P. 132334. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132334>.
3. Jing L., Wang N., Yin S. Shear performance of textile-reinforced concrete (TRC)-strengthened brick masonry walls // Constr Build Mater. 2023. Vol. 397. P. 132401. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132401>.
4. Compressive behaviour of concrete columns confined with textile reinforced concrete composites / Y. Li, S. Yin, Q. Wang, and B. Zhou // Journal of Building Engineering. 2024. Vol. 96. P. 110587. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110587>.
5. Textile reinforced concrete members subjected to tension, bending, and in-plane loads: Experimental study and numerical analyses / A. Sciegaj, S. Almfeldt, F. Larsson, K. Lundgren // Constr Build Mater. 2023. Vol. 408. P. 133762. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133762>.
6. Numerical model of tensile behavior of textile reinforced concrete (TRC) based on stress field analysis / S. Ye, C. Lu, P. She, Z. Li, T. Xie, C. K. Y. Leung // Constr Build Mater. 2023. Vol. 407. P. 133568. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133568>.
7. Flexural behavior of composite beams with textile reinforced concrete (TRC) permanent formwork considering interface characteristics / C. Wang, S. Yin, Y. Zhao, Y. Li // Journal of Building Engineering. 2025. Vol. 99. P. 111602. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.111602>.
8. Priyanga R., Muthadhi A. Bending analysis of textile reinforced concrete sandwich panels: Experimental and numerical evaluation // Constr Build Mater. 2024. Vol. 439. P. 137213. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137213>.
9. Numerical study of thermomechanical behaviour of reinforced concrete beams with and without textile reinforced concrete (TRC) strengthening: Effects of TRC thickness and thermal loading rate / N. Douk, X. H. Vu, A. Si Larbi, M. Audebert, R. Chatelin // Eng Struct. 2021. Vol. 231. P. 111737. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111737>.

10. Esaker M., Thermou G. E., Neves L. Behaviour of Textile Reinforced Concrete panels under high-velocity impact loading // Constr Build Mater. 2024. Vol. 445. P. 137806, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137806>.
11. Immanuel S., Kaliyamoorthy B. Investigating the effect of textile layers on the flexural response of Textile Reinforced Concrete (TRC) panels // Structures. 2025. Vol. 71. P. 108112. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.108112>.
12. Hutaibat M., Ghiassi B., Tizani W. Bond behaviour of prestressed basalt textile reinforced concrete // Constr Build Mater. 2024. Vol. 438. P. 137309. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137309>.
13. Betz P., Marx S., Curbach M. Biaxial compressive capacity of textile-reinforced concrete // Case Studies in Construction Materials. 2024. Vol. 20. P. e02986. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e02986>.
14. Kumar D., Ali S. F., Arockiarajan A. Theoretical and experimental studies on large deflection analysis of double corrugated cantilever structures // Int J Solids Struct. 2021. Vol. 228. P. 111126. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2021.111126>.
15. Study on the factors influencing bending spalling failure in BFRP textile-reinforced concrete / X. Zhang, X. Wang, X. Liang, Y. Zhang, Z. Wu // Journal of Building Engineering. 2025. Vol. 99. P. 111468. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.111468>.
16. Integrated analysis of kinematic form active structures for architectural applications: Experimental verification / M. Van Craenenbroeck, S. Puystiens, L. De Laet, D. Van Hemelrijck, W. Van Paepengem, and M. Mollaert // Eng Struct. 2016. Vol. 123. P. 59–70. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.05.032>.
17. Stability Analysis for Cofferdams of Pile Wall Frame Structures / R. Xue, S. Bie, L. Guo, P. Zhang // KSCE Journal of Civil Engineering. 2019. Vol. 23, no. 9. P. 4010–4021. <https://doi.org/10.1007/s12205-019-1320-7>.
18. Vibration damping method of cantilever structure considering redundant constraint of monocrystalline blade casting mold shell / X. Huiyu, B. Guangfu, Z. Da, S. Huaitao // Measurement. 2024. Vol. 236. P. 115100. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.115100>.
19. Ma S., Chen M., Skelton R. E. Design of a new tensegrity cantilever structure // Compos Struct. 2020. Vol. 243. P. 112188. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112188>.
20. Thermal conductivity of nano- and micro-crystalline diamond films studied by photothermal excitation of cantilever structures / L. Saturday [et al.] // Diam Relat Mater. 2021. Vol. 113. P. 108279. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2021.108279>.
21. High-sensitivity narrow-band T-shaped cantilever Fabry-perot acoustic sensor for photoacoustic spectroscopy / J. Wang [et al.] // Photoacoustics. 2024. Vol. 38. P. 100626. <https://doi.org/10.1016/j.pacs.2024.100626>.
22. Leclerc M., Léger P., Tinawi R. Computer aided stability analysis of gravity dams—CADAM // Advances in Engineering Software. 2003. Vol. 34, no. 7. P. 403–420. [https://doi.org/10.1016/S0965-9978\(03\)00040-1](https://doi.org/10.1016/S0965-9978(03)00040-1).

23. Out-of-plane shear performance of textile reinforced concrete sandwich panel: Numerical analysis and parametric study / J.-Q. Huang, M.-L. Dan, X. Chong, Q. Jiang, Y.-L. Feng, Y.-W. Wang // *Structures*. 2025. Vol. 71. P. 108080. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.108080>.
24. Bai X., Chen M. Lightweight design of tensegrity Michell truss subject to cantilever loads. *Compos Struct.* 2025. P. 118925. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2025.118925>.
25. Experimental and numerical simulation of pull-out response in textile-reinforced concrete / S. G. Venigalla, A. B. Nabilah, N. A. Mohd Nasir, N. A. Safiee, F. N. A. Abd Aziz // *Structures*. 2023. Vol. 57. P. 105132. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105132>.
26. Lai Y., Wu Y., Wang G. Novel long-span cable-stayed deck arch bridge: Concept and structural characteristics // *Eng Struct.* 2024. Vol. 308. P. 118026. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.118026>.
27. Gernay T. Performance-based design for structures in fire: Advances, challenges, and perspectives // *Fire Saf J.* 2024. Vol. 142. P. 104036. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.104036>.
28. Madhavi M. A., Madhavi T. C. Flexural behavior of warp knitted textile reinforced concrete impregnated with cementitious binder // *Case Studies in Construction Materials*. 2024. Vol. 20. P. e02884. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e02884>.
29. FEM-based real-time task planning for robotic construction simulation / Q. Xu, A. Zhu, G. Xu, Z. Shao, J. Zhang, and H. Zhang // *Autom Constr.* 2025. Vol. 170. P. 105935. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105935>.
30. Борисов Н. О., Столяров О. Н. Преимущества применения текстильно-армированного бетона в конструкциях консольного типа // Архитектура, строительство, транспорт. 2025. Т. 5(1). С. 81–92. <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-1-81-92> EDN: QMXDMF

References

- Qu F., Yin S., Wang F., Wang B. Effects of textile-reinforced concrete on the cyclic shear behavior of damaged confined brick masonry walls. *Journal of Building Engineering*. 2023; 78:107717. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107717>.
- Kalthoff M., et al. Fabrication of lightweight, carbon textile reinforced concrete components with internally nested lattice structure using 2-layer extrusion by LabMorTex. *Constr Build Mater.* 2023; 395: 132334. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132334>.
- Jing L., Wang N., Yin S. Shear performance of textile-reinforced concrete (TRC)-strengthened brick masonry walls. *Constr Build Mater.* 2023; 397: 132401. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132401>.
- Li Y., Yin S., Wang Q., Zhou B. Compressive behaviour of concrete columns confined with textile reinforced concrete composites. *Journal of Building Engineering*. 2024; 96: 110587. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110587>.

5. Sciegaj A., Almfeldt S., Larsson F., Lundgren K. Textile reinforced concrete members subjected to tension, bending, and in-plane loads: Experimental study and numerical analyses. *Constr Build Mater.* 2023; 408: 133762. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133762>.
6. Ye S., Lu C., She P., Li Z., Xie T., Leung C. K. Y. Numerical model of tensile behavior of textile reinforced concrete (TRC) based on stress field analysis. *Constr Build Mater.* 2023; 407:133568. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133568>.
7. Wang C., Yin S., Zhao Y., Li Y. Flexural behavior of composite beams with textile reinforced concrete (TRC) permanent formwork considering interface characteristics. *Journal of Building Engineering.* 2025; 99: 111602. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.111602>.
8. Priyanga R. Muthadhi A. Bending analysis of textile reinforced concrete sandwich panels: Experimental and numerical evaluation. *Constr Build Mater.* 2024; 439: 137213. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137213>.
9. Douk N., Vu X. H., Si Larbi A., Audebert M., Chatelin R. Numerical study of thermomechanical behaviour of reinforced concrete beams with and without textile reinforced concrete (TRC) strengthening: Effects of TRC thickness and thermal loading rate. *Eng Struct.* 2021; 231: 111737. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111737>.
10. Esaker M., Thermou G. E., Neves L. Behaviour of Textile Reinforced Concrete panels under high-velocity impact loading. *Constr Build Mater.* 2024; 445: 137806. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137806>.
11. Immanuel S., Kaliyamoorthy B. Investigating the effect of textile layers on the flexural response of Textile Reinforced Concrete (TRC) panels. *Structures.* 2025; 71: 108112. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.108112>.
12. Hutaibat M., Ghiassi B., Tizani W. Bond behaviour of prestressed basalt textile reinforced concrete. *Constr Build Mater.* 2024; 438: 137309. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137309>.
13. Betz P., Marx S., Curbach M. Biaxial compressive capacity of textile-reinforced concrete. *Case Studies in Construction Materials.* 2024; 20: e02986. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e02986>.
14. Kumar D., Ali S. F., Arockiarajan A., Theoretical and experimental studies on large deflection analysis of double corrugated cantilever structures. *Int J Solids Struct.* 2021; 228: 111126. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2021.111126>.
15. Zhang X., Wang X., Liang X., Zhang Y., Wu Z. Study on the factors influencing bending spalling failure in BFRP textile-reinforced concrete. *Journal of Building Engineering,* 2025; 99: 111468. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.111468>.
16. Van Craenenbroeck M., Puystiens S., Laet L. De, Van Hemelrijck D., Van Paepengem W., Mollaert M., Integrated analysis of kinematic form active structures for architectural applications: Experimental verification. *Eng Struct.* 2016; 123: 59–70. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.05.032>.

17. Xue R., Bie S., Guo L., Zhang P. Stability Analysis for Cofferdams of Pile Wall Frame Structures. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2019; 23(9): 4010–4021. <https://doi.org/10.1007/s12205-019-1320-7>.
18. Huiyu X., Guangfu B., Da Z., Huaitao S. Vibration damping method of cantilever structure considering redundant constraint of monocrystalline blade casting mold shell. *Measurement*. 2024; 236: 115100. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.115100>.
19. Ma S., Chen M., Skelton R. E. Design of a new tensegrity cantilever structure. *Compos Struct*. 2020; 243: 112188.: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112188>.
20. Saturday L., et al., Thermal conductivity of nano- and micro-crystalline diamond films studied by photothermal excitation of cantilever structures. *Diam Relat Mater*. 2021; 113: 108279. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2021.108279>.
21. Wang J., et al. High-sensitivity narrow-band T-shaped cantilever Fabry-perot acoustic sensor for photoacoustic spectroscopy. *Photoacoustics*. 2024; 38: 100626. <https://doi.org/10.1016/j.pacs.2024.100626>.
22. Leclerc M., Léger P., Tinawi R. Computer aided stability analysis of gravity dams—CADAM. *Advances in Engineering Software*. 2003; 34(7): 403–420. [https://doi.org/10.1016/S0965-9978\(03\)00040-1](https://doi.org/10.1016/S0965-9978(03)00040-1).
23. Huang J.-Q., Dan M.-L., Chong X., Jiang Q., Feng Y.-L., Wang Y.-W. Out-of-plane shear performance of textile reinforced concrete sandwich panel: Numerical analysis and parametric study. *Structures*. 2025; 71: 108080. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.108080>.
24. Bai X., Chen M. Lightweight design of tensegrity Michell truss subject to cantilever loads. *Compos Struct*, 2025. P. 118925. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2025.118925>.
25. Venigalla S. G., Nabilah A. B., Mohd Nasir N. A., Safiee N. A., Abd Aziz F. N. A. Experimental and numerical simulation of pull-out response in textile-reinforced concrete. *Structures*. 2023; 57: 105132. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105132>.
26. Lai Y., Wu Y., Wang G. Novel long-span cable-stayed deck arch bridge: Concept and structural characteristics. *Eng Struct*. 2024; 308: 118026. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.118026>.
27. Gernay T. Performance-based design for structures in fire: Advances, challenges, and perspectives. *Fire Saf J*. 2024; 142: 104036. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.104036>.
28. Madhavi M. A., Madhavi T. C. Flexural behavior of warp knitted textile reinforced concrete impregnated with cementitious binder. *Case Studies in Construction Materials*. 2024; 20: e02884. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e02884>.
29. Xu Q., Zhu A., Xu G., Shao Z., Zhang J., Zhang H. FEM-based real-time task planning for robotic construction simulation. *Autom Constr*. 2025; 170: 105935. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105935>.

30. Borisov N. O., Stolyarov O. H. Advantages of using textile-reinforced concrete in cantilever-type structures. *Arkhitektura, stroitel'stvo, transport = Architecture, construction, transport.* 2025; 5(1): 81-92. (In Russ.). <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-1-81-92> EDN: QMXDMF

Информация об авторах / Information about the Authors

Борисов Никита Олегович, аспирант,
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация,
e-mail: borisov.n@edu.spbstu.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7769-4931>

Столяров Олег Николаевич, доктор
технических наук, доцент ВШГиЭ,
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация,
e-mail: stolyarov_on@spbstu.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2930-5022>

Nikita O. Borisov, Post-Graduate Student, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation, e-mail: borisov.n@edu.spbstu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7769-4931>

Oleg N. Stolyarov, Dr. Sci. (Engineering), Associate Professor of the Higher School of Hydraulic and Power Engineering, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation, e-mail: stolyarov_on@spbstu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2930-5022>