

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» / Russian Journal of Transport Engineering <https://t-s.today>

2024, Том 11, № 1 / 2024, Vol. 11, Iss. 1 <https://t-s.today/issue-1-2024.html>

URL: <https://t-s.today/PDF/07SATS124.pdf>

DOI: 10.15862/07SATS124 (<https://doi.org/10.15862/07SATS124>)

2.1.8. Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей (технические науки)

Анализ нормативно-технической и справочной документации по проектированию и строительству мостов с пролетными строениями из полимерных композитных материалов

¹Ерофеев М.Н., ¹Рыбаков С.В., ²Ибрагимова А.А., ^{3,4}Овчинников И.Г.,
^{5,6}Луканкин С.А., ^{3,7}Овчинников И.И., ¹Пискунов А.А., ¹Мазур Е.В.

¹ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», Москва, Россия

²ФГБОУ ВО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет», Казань, Россия

³ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, Россия

⁴ФГАОУ ВО «Пермский национальный
исследовательский политехнический университет», Пермь, Россия

⁵ФГБОУ ВО «Казанский национальный

исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева-КАИ», Казань, Россия

⁶ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», Казань, Россия

⁷ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»,
Саратов, Россия

Автор, ответственный за переписку: Рыбаков Сергей Викторович, e-mail: Rybakov.sv@bk.ru

Аннотация. В статье представлен обзор отечественных и зарубежных научных трудов, нормативной и справочной документации, касающейся проектирования и строительства мостов с пролетными строениями из полимерных композитных материалов (ПКМ).

Учитывая динамичный характер развития строительной отрасли, актуальность проблем применения композитных материалов в мостостроении, представляется необходимым отметить современные источники, изданные или обновленные в последнее время.

В работе выполнены анализ и систематизация существующего опыта применения полимерно-композитных материалов в России и за рубежом, приведены основные стандарты и наиболее содержательные рекомендации в области транспортного строительства, рассмотрены руководства и методические указания по применению ПКМ при проектировании не только цельно-композитных пролетных строений, но и их составных элементов, а также документы, определяющие требования к испытанию материалов. Предоставлены сжатые обзоры содержания ряда документов и научных статей — приведены краткие изложения их основных положений.

В результате анализа технической документации, нормативной литературы и статей в периодической печати и интернет — журналах констатируется отсутствие единого подхода при проектировании, строительстве, а также ограниченный опыт эксплуатации мостов с цельно-композитными пролетными строениями.

Для того чтобы подтвердить возможность их безопасной эксплуатации, требуемой надежности, долговечности и соответствие потребительским свойствам, предъявляемым к такого рода сооружениям, необходимо проведение экспериментальных и теоретических исследований в высших учебных заведениях, научно — исследовательских, проектных и строительных организациях, специализированных заводах, выпускающих полимерно-композитные изделия, а также мониторинг элементов конструкции при эксплуатации существующих мостов.

Ключевые слова: полимерные композитные материалы; стандарты и рекомендации; нормативные документы; мосты из полимерно-композитных материалов; проблемы применения композитов; пролетное строение из полимерно-композитных материалов

Analysis of normative-technical and reference documentation on design and construction of bridges with superstructures made of polymer composite materials

¹Mikhail N. Erofeev, ¹Sergey V. Rybakov, ²Aniia A. Ibragimova, ^{3,4}Igor G. Ovchinnikov, ^{5,6}Sergei A. Lukankin, ^{3,7}Ilya I. Ovchinnikov, ¹Alexander A. Piskunov, ¹Evgeny V. Mazur

¹Russian University of Transport, Moscow, Russia

²Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russia

³Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia

⁴Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

⁵Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI, Kazan, Russia

⁶Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russia

⁷Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia

Corresponding author: Sergey V. Rybakov, e-mail: Rybakov.sv@bk.ru

Abstract. The article presents the review of domestic and foreign scientific works, normative and reference documentation concerning design and construction of bridges with superstructures made of polymer composite materials (PCM).

Taking into account the dynamic character of the construction industry development, the urgency of the composite materials application problems in bridge construction, it seems necessary to note the modern sources published or updated recently.

In the paper the analysis and systematisation of the existing experience of polymer-composite materials application in Russia and abroad are performed, the basic standards and the most substantial recommendations in the field of transport construction are given, the guidelines and methodical instructions for the application of PCM in the design of not only all-composite superstructures, but also their constituent elements, as well as the documents defining the requirements to the materials testing are considered. Concise contents overviews of a number of documents and scientific articles are provided — summaries of their main provisions are given.

As a result of the technical documentation analysis, normative literature and articles in periodicals and internet journals, it is stated that there is no unified approach in design, construction, and limited experience in operation of bridges with all-composite superstructures.

In order to confirm the possibility of their safe operation, the required reliability, durability and compliance with consumer properties required for such structures, it is necessary to conduct experimental and theoretical studies in higher educational institutions, scientific research organisations, design and construction organisations, specialised factories producing polymer-composite products, as well as monitoring of structural elements in the operation of existing bridges.

Keywords: polymer composite materials; standards and recommendations; normative documents; bridges from polymer-composite materials; problems of composite application; superstructure from polymer-composite materials

Данная статья доступна по лицензии Creative Commons “Attribution” («Атрибуция») 4.0 Всемирная

This article is available under the Creative Commons “Attribution” 4.0 Global License



Введение

Introduction

Несмотря на очевидные преимущества, комплексное применение полимерных композитных материалов (ПКМ) в мостостроении остается предметом активных дискуссий и небольшого количества экспериментальных исследований. В основе этих дискуссий лежит ряд технических, технологических и нормативных вопросов, связанных с отсутствием достаточного опыта проектирования, строительства и эксплуатации таких конструкций, потенциальными рисками, а также необходимостью корректировки существующих и разработки новых норм и стандартов. Хотя потенциал полимерных композитных материалов в мостостроении довольно большой, необходимы экспериментальные и теоретические исследования, прежде чем применение этих материалов станет общепринятой практикой в строительстве.

В работах Овчинникова И.И., Овчинникова И.Г., Ильченко Е.Д., Михалдыкина Е.С. [1; 2] в 2017 году проведена систематизация и анализ нормативной документации по применению ПКМ в мостостроении. Рассмотрены документы, касающиеся проектирования мостовых сооружений, испытаний ПКМ, использования полимерной композитной арматуры и геосинтетических материалов, применения ПКМ для усиления существующих мостов, а также в малонагруженных конструкциях.

В связи с развитием отрасли и постоянными технологическими изменениями целью данной работы является анализ и обновление информации об отечественной и зарубежной нормативной и справочной документации, относящейся к проектированию и строительству автодорожных мостов с цельно-композитными пролетными строениями.

США

USA

В США разработка нормативных документов по строительству мостов с применением ПКМ проходит под руководством таких организаций, как AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials), FHWA (Federal Highway Administration) и ASTM (American Society for Testing and Materials).

AASHTO — неправительственная организация, которая устанавливает стандарты и публикует руководящие документы для дорожного строительства.

FHWA — это подразделение Министерства транспорта США, специализирующееся на автомобильных перевозках. Основной целью является обеспечение безопасности, эффективности и надежности транспортной сети.

ASTM — это международная организация, разрабатывающая и публикующая стандарты, которая была основана в 1898 году. Ими разрабатываются технические стандарты для широкого перечня продуктов, услуг, систем и материалов, таких как: металлы, строительство, пластмассы, нефть и газ, авиация, химия и многие другие.

С полным списком стандартов в части композитных материалов можно ознакомиться на официальном сайте организации — www.astm.org, раздел «Composite standards».

AASHTO разработан документ **LRFD Bridge Design Specifications (AASHTO LRFD)**¹, устанавливающий стандарты и рекомендации по проектированию мостов на основе метода предельных состояний (LRFD — Load and Resistance Factor Design), в котором изложено требование: каждый компонент или соединение в общем случае должны удовлетворять уравнению (1), если не указано иное.

$$\sum \eta_i \gamma_i Q_i \leq \phi R_n = R_r, \quad (1)$$

где η_i — коэффициент, зависящий от пластичности, запаса прочности и ответственности сооружения, (в РФ — это коэффициент условий работы); γ_i — коэффициент нагрузки (статистически обоснованный множитель, применяемый к силовым воздействиям), (в РФ — это коэффициент надежности по нагрузке); Q_i — возникающее усилие; ϕ — коэффициент сопротивления (статистически обоснованный множитель, применяемый к нормативному сопротивлению), (в РФ — это коэффициент надежности по материалу); R_n — нормативное сопротивление; R_r — расчетное сопротивление.

В пункте 8.4.1.3 раздела 8, посвященного деревянным конструкциям, рассматривается усиление элементов из клееного бруса полимерными композитными материалами, однако данный документ не содержит информации о проектировании цельно-композитных пролетных строений.

С развитием полимерных композитных материалов и ростом интереса к их использованию на инфраструктурных объектах, включая мосты, возникла потребность в создании нормативной базы. Одним из первых документов, регулирующих проектирование пешеходных мостов из полимерных композитных материалов и выпущенных AASHTO в

¹ AASHTO LRFD Bridge Design Specifications (9th Edition), ISBN(s): 9781560517382, 2020. — 1914 p.

2008 году, стал **Guide Specifications for Design of FRP Pedestrian Bridges (GSDFPB-1)**² — специализированное руководство по проектированию пешеходных мостов, выполненных из волоконно-армированных полимеров (FRP). Заметим, что пешеходные мосты часто служат «полигоном» для испытания новых материалов и технологий, так как они испытывают меньшие нагрузки, потенциальные проблемы при их конструировании гораздо менее критичны с точки зрения безопасности, по сравнению с автодорожными мостами.

Специализированное руководство **GSDFPB-1** включает в себя следующие разделы:

«**Введение**», которое содержит общие сведения и цели руководства.

В разделе «**Нагрузки**» рассматриваются различные виды нагрузок, включая временные нагрузки (от пешеходов, транспортных средств, воздействий ветра и других).

В разделе «**Особенности проектирования**» раскрываются требования, предъявляемые при проектировании к деформациям, вибрациям, допустимым напряжениям, минимальной толщине ПКМ, соединениям и другим конструктивным особенностям.

Раздел «**Комментарии**» содержит дополнительные пояснения к основному тексту документа.

Цель руководства — предоставить инженерам и проектировщикам указания по применению полимерных композитных материалов при проектировании пешеходных мостов.

D4762-18 Standard Guide for Testing Polymer Matrix Composite Materials.³ В этом руководстве кратко описывается применение стандартных методов испытаний ASTM к композитным материалам с полимерной матрицей, армированной непрерывными волокнами. В руководство включены наиболее часто используемые или наиболее применимые стандарты ASTM по полимерным композитным материалам.

D8335-20 Standard Guide for Identification of Fiber-Reinforced Polymer-Matrix Composite Materials.⁴ Данное руководство предназначено для классификации полимерных композитных материалов. Цель его состоит в том, чтобы достаточно подробно описать и классифицировать известные параметры материалов.

² Guide Specifications for Design of FRP Pedestrian Bridges, 1st Edition, 2008. — 15 p.

³ ASTM D4762-18. Standard Guide for Testing Polymer Matrix Composite Materials, 2018. — 25 p.

⁴ ASTM D8335-20. Standard Guide for Identification of Fiber-Reinforced Polymer-Matrix Composite Materials, 2020. — 13 p.

D6507-19 Standard Practice for Fiber Reinforcement Orientation Codes for Composite Materials.⁵ Этот стандарт определяет методы и нормы ориентирования полимерных волокон в трехмерном пространстве элементов конструкции.

Laminate Specification and Characterization: Composite Bridge Decking, FHWA-HIF-12-020.⁶

Отчет FHWA содержит информацию о проведении исследований по разработке полимерного композитного настила для автодорожных мостов. Указывается, что количество слоев, тип волокна (углеродное, стеклянное или другое), конфигурация ткани (например, тканый, сшитый коврик, однонаправленный), тип смолы и другие факторы могут варьироваться для создания конструктивного элемента, подходящего под конкретные цели.

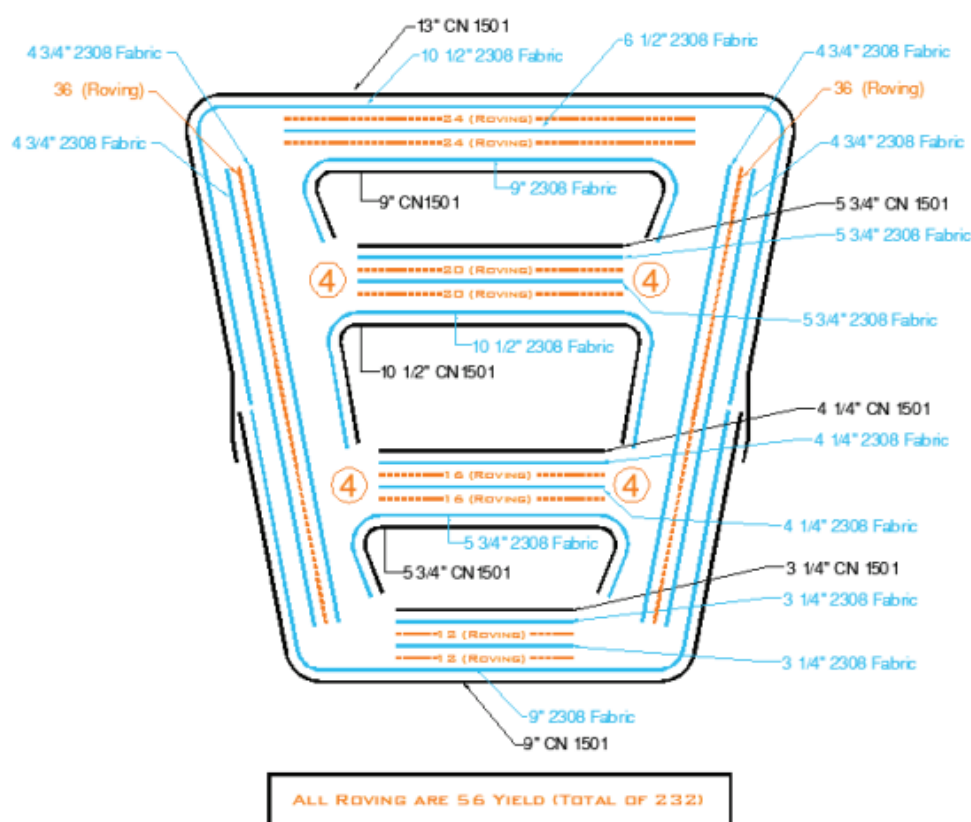


Рисунок 1. Трапецевидная конструкция пултрузионного профиля балки, составляющего плиту мостового настила (источник: https://www.fhwa.dot.gov/hfl/partnerships/composite_bridge/hif13029/chap03.cfm#fig3)

Figure 1. Trapezoidal design of a pultruded beam profile making up a bridge deck slab (source: https://www.fhwa.dot.gov/hfl/partnerships/composite_bridge/hif13029/chap03.cfm#fig3)

⁵ ASTM D6507-19. Standard Practice for Fiber Reinforcement Orientation Codes for Composite Materials, 2019. — 5 p.

⁶ Laminate Specification and Characterization — Composite Bridge Decking, FHWA-HIF-12-020, 2012. — 42 p. URL — <https://ntlrepositary.blob.core.windows.net/lib/68000/68000/68033/FHWA-HIF-12-020.pdf> (Дата обращения — 23.12.2023).

Проектной группой, готовившей работу, был проведен поиск литературы по теме исследования, запрошены тестовые образцы у производителей полимерных композитных материалов, которые затем были протестированы. Рассматривались различные процессы изготовления профиля: ручная, вакуумная инфузия и пултрузия. В отчете описывается работа по определению характеристик и проведению испытаний, а также различные конфигурации ламината (рис. 1).

Composite Bridge Decking, Publication No. FHWA-HIF-13-029.⁷

Документ описывает результаты технологического партнерства университета Буффало с правительством США в рамках программы FHWA по разработке и изготовлению конструкции полимерной композитной плиты настила. В процессе исследования был проведен численный эксперимент с использованием метода конечных элементов, а затем проведены лабораторные испытания, которые подтвердили результаты расчетов. В 2012 году выполнен монтаж настила на пролетном строении действующего автомобильного моста, а анализ работы конструкции под действием автомобильной нагрузки (рис. 2) помог откалибровать конечно-элементную модель, тем самым обеспечив ее достоверность и надежность.



Рисунок 2. Испытания для определения грузоподъемности моста с полимерно-композитным настилом (источник: https://www.fhwa.dot.gov/hfl/partnerships/composite_bridge/hif13029/chap04.cfm#fig32)

Figure 2. Trials to determine the load carrying capacity of a bridge with a polymer composite deck (source: https://www.fhwa.dot.gov/hfl/partnerships/composite_bridge/hif13029/chap04.cfm#fig32, author: J.S. O'Connor)

⁷ Composite Bridge Decking — Final Project Report, FHWA-HIF-13-029, 2013. — 88 p. URL — https://www.fhwa.dot.gov/hfl/partnerships/composite_bridge/hif13029/hif13029.pdf (Дата обращения — 23.12.2023).

J.S. Groenier, Merv Eriksson, S. Kosmalski. A Guide to Fiber-Reinforced Polymer Trail Bridges [3]. Пособие является руководством по проектированию, строительству, испытаниям и эксплуатации пешеходных мостов из ПКМ. Оно содержит следующие разделы:

«**Введение и обзор**», который начинается с исторической справки и базовой информации о применении ПКМ в мостостроении. Обзор включает описание процесса пултрузии при производстве композитных материалов. Также описываются преимущества и недостатки использования ПКМ.

«**Планирование, заказ и установка ПКМ-мостов**» содержит информацию по процессу планирования, доставки и монтажа конструкций, включая разные типы полимерных композитных мостов, рекомендации по транспортировке, хранению и установке, а также меры по безопасности.

В разделе «**Проектирование**» подробно рассматриваются технические требования при проектировании полимерных композитных мостов.

«**Мониторинг и обслуживание ПКМ-мостов**» — изложены различные методы испытания, признаки дефектов при строительстве и повреждений, образующихся во время эксплуатации, дается информация о ремонте и обслуживании.

Раздел «**Испытания в лаборатории**» посвящен лабораторным испытаниям конструкций.

«**Исследование конкретных ситуаций**» — приводятся примеры строительства объектов и проблемы, возникшие при транспортировке, строительстве, эксплуатации и других этапах жизненного цикла ПКМ-мостов.

В разделе «**Приложения**» дается дополнительная информация, включающая словарь узкоспециализированных терминов, спецификации, примеры инструкций по установке, дополнительные исследования и ресурсы.

В США балки из стеклопластика на автодорожных мостах были впервые разработаны и применены в середине 90-х годов (рис. 3).

Начиная с 1996 года Отдел автомобильных дорог (WVDOT-DOH) Департамента транспорта Западной Вирджинии начал программу по использованию полимерных материалов, армированных волокнами. Из 25 вариантов применения ПКМ на мостах WVDOT-DOH 92 % были завершены в период с 1996 по 2004 год, что позволило получить данные об особенностях их эксплуатации за период более десяти лет.



Рисунок 3. Литые U-образные балки (перевернутые) для моста INEEL [4]

Figure 3. Cast U-beams (inverted) for INEEL bridge [4]

В [5] приводится краткое описание того, как были внедрены ПКМ, где приведены следующие результаты отчетов:

- Из 12 стеклопластиковых плит настилов ездового полотна 10 находились в эксплуатации, две плиты были заменены после девяти лет эксплуатации в связи с несовершенной технологией изготовления. В целом плиты настила из стеклопластика продемонстрировали хорошие эксплуатационные свойства.

- На всех плитах была уложена дорожная одежда, состоящая либо из полимербетона, либо из асфальтобетона. Поперечные трещины на покрытии стали типичной проблемой, которая встречалась в ранних проектах. Недостатки дорожных одежд были в основном решены в более поздних проектах благодаря совершенствованию конструкции, соответствующему подбору материалов и методов устройства. Стеклопластиковые плиты получают большие перемещения под автомобильной нагрузкой, что вызывает концентрацию напряжений в стыках панелей и приводит к образованию трещин в дорожной одежде. Однако, поскольку стеклопластик не подвергается коррозии от контакта с водой, эти трещины обычно не создают проблем с эксплуатацией. Фактически, трещины были замечены на некоторых объектах вскоре после строительства, но с тех пор существенно не изменились.

- Арматура из стеклопластика использовалась в конструкциях ездового полотна на 6 железобетонных мостах в период с 1996 по 2001 год. Прокорродировавший слой на поверхности стальной арматуры распухает при коррозии, особенно в условиях, когда применяются противогололедные реагенты, а несущая часть сечения арматуры уменьшается. Арматура же из стеклопластика не подвержена коррозии, что делает ее применение

предпочтительнее в условиях, где широко используются противогололедные реагенты. По результатам обследований 3 плиты настила оценены как находящиеся в хорошем состоянии, в то время как остальные 3 — в удовлетворительном. Мосты имеют аналогичную конструкцию, состоящую из предварительно напряженных бетонных коробчатых балок и бетонной плиты настила с арматурой из стеклопластика. Везде присутствуют схожие повреждения, включая трещины шириной до 0,16 см. В целом опыт применения полимерной композитной арматуры в плитах настила был признан положительным.

В статье [5] отмечается, что для ремонта бетонных опор и устоев в 5 проектах использовались холсты из ПКМ. Во всех случаях применения дефектов и повреждений не обнаружено, и только в одном случае краска на холсте начала отслаиваться.

По итогам обследований были получены положительные результаты по применению полимерных композитов в мостостроении.

Канада

Canada

В Канаде разработкой стандартов и технических норм занимается Canadian Standards Association (CSA). Организация была основана в 1919 году в Канаде и является национальным органом по стандартизации в стране.

Стандарт **CSA S6 — Canadian Highway Bridge Design Code (CHBDC)**.⁸ Это основной стандарт, который регулирует проектирование автомобильных мостов в Канаде.

CHBDC содержит требования и рекомендации по различным вопросам мостостроения, включая геотехнические условия, материалы, нагрузки и другие факторы.

Раздел 16 Canadian Highway Bridge Design Code (CSA S6) посвящен требованиям к элементам мостов, которые содержат волокноармирование. В частности, эти требования применяются к:

- полностью или частично преднапряженным железобетонным балкам и плитам;
- ненапряженным железобетонным балкам, плитам и покрытиям;
- ограждающим конструкциям;

⁸ CSA S6. Canadian Highway Bridge Design Code, 2019. — 1185 p.

- железобетонным элементам с внешними системами армирования на основе волокноно-армированного полимера (FRP) и с наклеиваемым внешним армированием;
- деревянным элементам с внешними или внутренними системами армирования на основе стекловолоконного армированного полимера (GFRP) и наклеиваемым внешним армированием.

Этот раздел описывает применение волокноно-армированных компонентов в различных частях мостовых конструкций и формулирует требования к их проектированию и применению, но не содержит информации о цельнокомпозитных пролетных строениях. Таким образом, можно отметить отсутствие в Канаде нормативных документов, специально посвященных проектированию цельнокомпозитных мостов.

И это несмотря на то, что в Канаде имеется несколько крупных строительных организаций, которые успешно разрабатывают и строят автодорожные мосты из полимерных композитных материалов, например CMSi (CMS Infrastructure) — проектно-производственная компания, специализирующаяся на использовании инновационных материалов, включая композиты и пластмассы.

Одним из проектов, реализованных с использованием технологии InfraCore компании CMSi является мост Маарссензевег в Утрехте (рис. 4) [6]. Его длина составляет 6,8 м, ширина — 9 м. Мост построен в 2011 году.



*Рисунок 4. Автодорожный полимерный
композитный мост Маарссензевег в Утрехте [6]*

Figure 4. Salmon River Bridge — the world's first bridge with a steel-free deck slab [6]

Великобритания

United Kingdom

CIRIA (Construction Industry Research and Information Association) — это ведущий исследовательский институт в области строительства в Великобритании. В нем разрабатывается и публикуется ряд руководящих документов и отчетов по различным темам, связанным со строительством, включая использование инновационных материалов и технологий.

Прогресс в применении стеклопластиков для строительства мостов был частично ограничен отсутствием подходящих стандартов проектирования и руководств по использованию этих материалов для обеспечения технически эффективного и экономичного проектирования. Конструкционный материал FRP не подпадал под действие еврокодов первого поколения, которые были приняты в Великобритании в 2010 году. Одним из документов, решающих эту проблему, стал **CIRIA C779 — Fibre-reinforced polymer bridges — guidance for designers**⁹ (**мосты из фиброармированного пластика — руководство для проектировщиков**). Это первое издание, предназначенное для проектирования мостов из стеклопластика, которое было разработано при поддержке всех ведущих экспертов, заказчиков, подрядчиков и университетов, работающих в этом секторе строительной индустрии Великобритании. Руководство выпущено в 2018 году и предназначено для проектирования, закупки, монтажа и мониторинга новых мостов, компоненты которых в виде профилей или систем изготавливаются с использованием армированного волокнами полимерного композиционного материала (ПКМ).

Во «**Введении**» подготовлен обзор тематики документа, его цели и актуальность применения FRP (ПКМ) в мостостроении.

В разделе «**История ПКМ-мостов**» приводится история развития мостов из ПКМ, а также основные причины, по которым инженеры и дизайнеры рассматривают этот материал как альтернативу традиционным.

Обобщенные принципы проектирования мостов из ПКМ, нагрузки и воздействия изложены в разделе «**Концептуальное проектирование**».

В разделе «**Материалы**» рассмотрены свойства материалов, их достоинства, недостатки, а также ограничения в применении.

⁹ CIRIA C779 — Fibre-reinforced polymer bridges — guidance for designers, 2018. — 132 p. URL — <https://sisau.com.au/wp-content/uploads/2019/03/CIRIA-C779-Fibre-Reinforced-Polymer-FRP-bridges-guidance-for-designers.-web.pdf> (Дата обращения — 23.12.2023).

Раздел **«Проектирование строительных конструкций»** посвящен методикам расчета конструкций мостов из ПКМ, учету нагрузок и критериев безопасности.

В разделе **«Строительство мостов из ПКМ»** — приведено описание процесса строительства, особенности выполнения работ, технологические процессы.

В разделе **«Проведение осмотров, мониторинг и техническое обслуживание»** изложены рекомендации по проведению осмотров, мониторингу и обслуживанию мостов из ПКМ.

Раздел **«Устойчивость»** посвящен рассмотрению одноименных вопросов.

В **«Заключении»** приводятся заключительные положения и рекомендации по проектированию, строительству и эксплуатации мостов из ПКМ.

Отдельное внимание стоит обратить на раздел **«A1 Case studies of UK FRP bridges»**. Здесь перечислен ряд примеров проектов мостов из стеклопластика, выполненных в Великобритании с 1992 по 2016 год.

23 примера объектов говорят о том, что технология применялась в самых разных условиях, которые включают в себя различные географические районы, климатические условия и требования к проектированию. Наличие такого количества сооружений свидетельствует о том, что мосты из ПКМ получили достаточно широкое признание в инженерном сообществе Великобритании. Вместе с тем рассматриваемый документ играет роль справочного и не является предписывающим стандартом для проектирования.



Рисунок 5. West Mill Bridge, Oxfordshire, Великобритания, 2002 [7]

Figure 5. West Mill Bridge, Oxfordshire, UK, 2002 [7]

Рассмотрим один из примеров — мост Уэст-Милл (рис. 5), построенный через реку Коул близ Шривенхэма в Оксфордшире, Великобритания, в 2002 году. Это был первый в Западной Европе автомобильный мост полностью из стеклопластика, в состав которого вошли композиты, армированные стеклом и углеродным волокном. Пролет моста составляет 10 м, а ширина — 6,8 м. Мост состоит из четырех 10-метровых углепластиковых коробчатых балок.

Рассмотрим обзорную публикацию **Mara V. & Haghani R. (2015). Review of FRP decks: structural and in-service performance. Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Bridge Engineering, 168(4), 308–329. doi: 10.1680/bren.14.00009** [8]. Этот обзор охватывает конструкции и эксплуатационные характеристики ездового полотна из стеклопластика, используемого в автомобильных мостах, и не включает любое усиление мостов с использованием материалов из стеклопластика, путем приклеивания холстов и ламелей к существующим сооружениям. Были собраны и проанализированы последние исследования в данной области, которые обсуждались с экспертами. Рассмотрены конструктивные характеристики стальных мостов с ездовым полотном из стеклопластика, включая усталостные характеристики, взаимодействие полотна с нижележащими балками, характеристики различных соединений, а также наблюдаемые режимы разрушения. В заключение сформулированы направления для дальнейших исследований.

Проанализируем работу **Jawed Qureshi (2023). A Review of Fibre Reinforced Polymer Bridges** [9]. В ней рассматриваются мосты из стеклопластика, включая полностью стеклопластиковые и гибридные мосты. Анализируется история мостов из стеклопластика, материалы, технологические процессы и компоненты мостов — ездовое полотно, балки, фермы, формованные детали и тросы/арматура. В работе не обсуждается использование стеклопластика в качестве архитектурного элемента и систем усиления. По мнению автора этой работы основными проблемами являются отсутствие проектных норм, спецификаций, возможностей вторичной переработки материала после демонтажа и высокая стоимость материалов.

Европа

Europe

В Европе документы и стандарты, касающиеся проектирования различных строительных конструкций, в том числе мостов из полимерных композитных материалов, представлены Еврокодами.

Еврокоды — это серия европейских стандартов (EN), которые описывают общий подход к проектированию строительных конструкций. У Европейского Союза ещё не было полностью разработанных спецификаций Еврокода для проектирования мостов из FRP. Вместо этого проектирование таких мостов базировалось на:

- а) научных исследованиях и публикациях;
- б) национальных руководствах и документах (имеется ввиду, что некоторые страны разработали свои национальные руководства или стандарты по проектированию мостов из полимерных композитных материалов);
- в) международных руководствах (в отсутствие единого европейского стандарта многие страны могут обращаться к международным рекомендациям и руководствам, разработанным ASTM, ACI или другими организациями);
- г) производственных рекомендациях (производители полимерных композитных материалов и продуктов часто предоставляют технические руководства и рекомендации по проектированию и установке своих продуктов, которыми можно воспользоваться).

Основы проектирования, изложенные в стандарте **Eurocode BS EN 1990:2002+A1:2005**¹⁰, могут быть использованы для проектирования мостовых конструкций из стеклопластика. Раздел 3 этого стандарта устанавливает принципы проектирования предельных состояний, которые должны использоваться, включая проектные ситуации (например, постоянные, переходные, аварийные), то есть ULS (первая группа предельных состояний) и SLS (вторая группа предельных состояний). Нагрузки на мосты, как правило, можно получить из соответствующих разделов стандарта BS EN 1991.

Spain

Испания

Мост Астурия (рис. 6), является первым автомобильным мостом из стеклопластика, построенным в Испании в 2004 году. Это четырехпролетный мост с балками из углепластика, опирающимися на три промежуточные опоры и два устоя. Длина моста составляет 46 м с двумя средними пролетами по 13 м и двумя крайними пролетами по 10 м.

¹⁰ BS EN 1990:2002+A1:2005. Eurocode. Basis of structural design, 2010. — 120 p. URL — <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1990.2002.pdf> (Дата обращения — 17.11.2023).



Рисунок 6. Asturias Bridge, Испания, 2004 [9]

Figure 6. Asturias Bridge, Spain, 2004 [9]

Проанализируем тезисы **Paweł Bernard Potyrała (2011). Use of Fibre Reinforced Polymer Composites in Bridge Construction. State of the Art in Hybrid and All-Composite Structures**¹¹, цель которой — исследование ПКМ, используемых в гражданском строительстве, оценка текущего состояния мостовых конструкций с использованием стеклопластиковых композитов в качестве замены традиционным материалам.

Основная часть работы состоит из 12 глав: пять из них посвящены описанию материалов и общим областям применения в мостостроении, остальные — вопросам, относящимся к двум конкретным областям применения: гибридным и цельнокомпозитным мостовым конструкциям.

В первой главе дается общее представление о ПКМ, приводится определение его как строительного материала и сравнение с аналогичными традиционными материалами.

Вторая глава посвящена компонентам ПКМ, в ней представлены различные виды волокон, используемых для армирования, сравниваются их свойства, описываются ингредиенты матрицы: смолы, наполнители и добавки.

В третьей главе рассматриваются свойства стеклопластиковых композитов, такие как плотность, модуль упругости, коэффициенты Пуассона, предел прочности при растяжении, даются упрощенные формулы для определения их значений.

¹¹ Paweł Bernard Potyrała (2011). Use of Fibre Reinforced Polymer Composites in Bridge Construction. State of the Art in Hybrid and All-Composite Structures. URL: <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/31126> (дата обращения 24.01.2024).

В четвертой главе кратко описываются области применения стеклопластиковых композитов в мостостроении: ремонт и модернизация существующих мостовых конструкций, армирование бетона, гибридные и цельнокомпозитные мостовые конструкции.

Пятая глава посвящена способам производства ПКМ и конструкций на их основе, имеющим отношение к гражданскому строительству, причем процессы разделяются на ручные, полуавтоматические и автоматизированные. Особый интерес представляет процесс пултрузии, который обеспечивает возможность изготовления композитных элементов из стеклопластика в больших объемах.

В шестой главе представлен сортамент конструкционных профилей, тросов и настилов мостов из ПКМ, производимых различными компаниями по всему миру.

В седьмой главе дается краткий обзор текущего состояния норм и руководств по проектированию, касающихся использования стеклопластиковых композитов в качестве конструкционного материала.

В восьмой главе представлены и сравниваются различные виды соединений между композитными элементами из стеклопластика: адгезивные, механические и смешанные.

В девятой главе сравниваются стеклопластиковые композиты с традиционными материалами, их преимущества и недостатки (неопределенности).

В десятой и одиннадцатой главах представлены некоторые примеры существующих гибридных и цельнокомпозитных мостовых конструкций. Выбранными примерами являются конструкции, различающиеся по типу конструкции, году постройки и используемой композитной системе.

В двенадцатой главе представлен список из 355 мостов, использующих в своей конструкции ПКМ, с указанием названия сооружения, местоположения, года сборки и некоторых основных доступных данных, обычно включая длину и ширину моста, и компанию-изготовителя, а также ссылки на дополнительную информацию (статьи, фотографии и т. д.).

Китай

China

GB/T 31539-2015 Pultruded fiber reinforced polymer composites structural profiles.¹² Стандарт определяет параметры пултрузионных профилей из ПКМ, классификацию, маркировку, используемое сырье,

¹² GB/T 31539-2015. Pultruded fiber reinforced polymer composites structural profiles, 2015.

требования, методы испытаний, правила контроля, упаковки, транспортировки и хранения. Применяется к зданиям, мостам, электроэнергетической, химической и другим отраслям промышленности для несущих конструкций, армированных пултрузионными профилями из полимерно-композитного материала.

L.P. Ye, P. Feng, X.Z. Lu, P. Qian, L. Lin, Y.L. Huang and W.H. Hu (2004) FRP in China: the state of FRP research, design guidelines and application in construction [10].

В статье приведены результаты исследований в области ПКМ, рекомендации по проектированию в строительстве на материковой части Китая. Охватывается усиление конструкций листами и пластинами из стеклопластика, железобетонные конструкции с использованием арматуры из стеклопластика, а также цельнокомпозитные мосты.

Long Tang (2021). Maintenance and Inspection of Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bridges: A Review of Methods [11]. Рассматриваются методы технического обслуживания и мониторинга конструкций мостов из стеклопластика, анализируются преимущества, недостатки и стоимость этих методов.



Рисунок 7. Устройство для волочения цепи [12]

Figure 7. Chain drawing device [12]

Результаты показывают, что следует последовательно использовать две категории методов. Сначала для определения потенциального повреждения используются простые методы, такие как визуальный осмотр, методы удара и волочения цепи (это неразрушающий метод, который включает в себя волочение цепей по поверхности ездового полотна моста и прослушивание звуков, издаваемых вибрирующими цепями — рис. 7), а затем используются методы ультразвукового контроля, модальный анализ и эксперименты с нагрузкой для определения вида и степени повреждения.

Japan

Япония

Japan Society of Civil Engineers (JSCE) — это одна из ведущих инженерных ассоциаций в Японии. Они регулярно публикуют руководства и стандарты по различным вопросам гражданского строительства.

Guidelines for Design and Construction of FRP Footbridges, Hybrid Structure Series 04, JSCE, 2011.¹³

Во «Введении» дан обзор ПКМ, их свойств, достоинств, недостатков и потенциальных применений в области строительства мостов.

Раздел «Проектирование» представляет из себя руководство по выбору материалов, расчету нагрузок, учету особенностей ПКМ (таких как анизотропия).

В разделе «Строительство» изложены рекомендации по способам монтажа, соединения элементов и учету особенностей материала в процессе строительства.

«Гибридные конструкции» — как указано в названии, документ рассматривает применение ПКМ в сочетании с другими материалами, например, сталью или бетоном для создания гибридных конструкций.

Раздел «Мониторинг и обслуживание» дает рекомендации по обслуживанию, осмотрам и мониторингу мостов с применением ПКМ для обеспечения их безопасности и долговечности.

Standard Specifications for Hybrid Structures, 2009, JSCE.¹⁴

¹³ Guidelines for Design and Construction of FRP Footbridges, Hybrid Structure Series 04, JSCE, 2011.

¹⁴ Japan Society of Civil Engineers (JSCE), Committee on Hybrid Structures of Japan Society of Civil Engineers, Standard Specifications for Hybrid Structures-2009.

Nakamura S., Yamada S., Sugiura K. & Nishizaki I. (2012). Guidelines for Design and Construction of Fibre-Reinforced Polymer Footbridges in Japan. Structural Engineering International, 22(2), 250–253 [13]. ПКМ широко используются для армирования существующих конструкций благодаря их небольшому весу и высокой коррозионной стойкости. Несколько сотен объектов с применением этого материала в мире показывают, что стеклопластик также может быть применен к основным конструктивным элементам мостов. В Японии, хотя его применение для армирования стало популярным методом, на сегодняшний день построено лишь несколько мостов из стеклопластика. Одна из основных причин — отсутствие нормативных документов — стандартов, руководств для проектирования и строительства мостов из стеклопластика.

Russia

Россия

В 2014 г. была принята Программа Федерального дорожного агентства по внедрению композиционных материалов (композитов), конструкций и изделий из них на 2015–2020 гг.¹⁵ В ней отмечается, что полимерные композиционные материалы, изделия и конструкции из них широко применяются во всем мире при строительстве объектов транспортной инфраструктуры.

В строительной отрасли полимерные композиционные материалы (ПКМ) начали применяться с 1970-х годов. В мостостроении композиты используются более 30 лет [14]. К моменту, когда полимерные композиционные материалы в нашей стране начали использоваться в строительстве, за рубежом уже был накоплен значительный опыт их использования при строительстве зданий и сооружений.

Следует отметить, что на сегодняшний день не сформированы нормативно-технические требования, а также методическая база по проектированию, строительству и эксплуатации сооружений из полимерных композиционных материалов при возведении объектов транспортной инфраструктуры, а введенная к настоящему времени нормативно-техническая документация применяется пока в ограниченном объеме.

¹⁵ Программа Федерального дорожного агентства по внедрению композиционных материалов (композитов), конструкций и изделий из них на 2015–2020 гг. [Электронный ресурс]: официальный сайт Федерального дорожного агентства Росавтодор — Режим доступа: <https://rosavtodor.gov.ru/docs/gosudarstvennyye-programmy/1036> (дата обращения: 24.10.2023).

Так, стандарты, разработанные для проектирования и расчета пешеходных мостов из ПКМ нельзя в полной мере применить к проектированию и расчету автодорожных мостов из ПКМ, что требует проведения испытаний и теоретических исследований для разработки и внедрения проектов на автомобильных дорогах.

Кроме того, многие российские документы копируют зарубежные нормативные и методические материалы, предназначенные в основном для проектирования пешеходных мостов из ПКМ [1].

Выполненный обзор и краткий анализ отечественной и зарубежной нормативно-технической документации посвящен применению полимерных композиционных материалов в сфере транспортного строительства при проектировании мостовых сооружений и их элементов (пролетных строений, плит проезжей части, тротуарных настилов, и т. д.) из ПКМ.

Одними из первых документов, регламентирующих требования к полимерным композитам, конструкциям и изделиям из них, пригодными для применения в дорожном хозяйстве России стали:

- ГОСТ 25.601-80 «Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания плоских образцов на растяжение при нормальной, повышенной и пониженной температурах»¹⁶, где сформулирована сущность метода, описано оборудование, определен процесс подготовки образцов, изложена методика испытания и подход к обработке результатов. Стандарт введен в действие в 1981 г. и был отредактирован в 2005 г.

- ГОСТ 25.602-80 «Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания на сжатие при нормальной, повышенной и пониженной температурах». ¹⁷ Документ регулирует методику испытания композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). В нем излагается сущность метода, процесс подготовки образцов и проработка результатов. Стандарт введен в действие в 1981 г. и был отредактирован в 2005 г.

- ГОСТ 25.603-82 «Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания на растяжение кольцевых

¹⁶ ГОСТ 25.601-80 Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания плоских образцов на растяжение при нормальной, повышенной и пониженной температурах — М.: Стандартинформ, 2005. — 9 с.

¹⁷ ГОСТ 25.602-80 Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания на сжатие при нормальной, повышенной и пониженной температурах — М.: Стандартинформ, 2005. — 13 с.

образцов при нормальной, повышенной и пониженной температурах».¹⁸ Содержание стандарта включает в себя назначение метода, оборудование для испытаний, образцы, подготовку и проведение испытаний, расчетные формулы и обработку результатов. Стандарт введен в действие в 1984 г. и был отредактирован в 2005 г.

- ГОСТ 25.604-82 «Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания на изгиб при нормальной, повышенной и пониженной температурах»¹⁹, введенный в действие в 1984 г. и отредактированный в 2005 г. Содержание документа аналогично приведенным выше стандартам.

Первым национальным стандартом РФ по мостам из полимерных композитов стал ГОСТ Р 54928-2012 «Пешеходные мосты и путепроводы из полимерных композитов. Технические условия»²⁰, разработанный и утвержденный в 2012 г. В документе указано, что разработка настоящего стандарта вызвана необходимостью регламентировать требования к несущим конструкциям и другим конструктивным элементам пешеходных мостов и путепроводов (временных и постоянных) из полимерных композитов, изготавливаемых по технологии вакуумной инфузии. Следует отметить, что настоящий стандарт не распространяется на несущие конструкции пешеходных мостов и путепроводов (временных и постоянных), изготавливаемые из композитных полимерных пултрузионных конструкционных профилей. Документ устанавливает требования к несущим конструкциям из ПКМ, требования к полимерным композитам, применяемым при изготовлении конструктивных элементов, требования к методам контроля при определении показателей и характеристик конструктивных элементов и полимерных композитов, а также общие требования к расчетам конструктивных элементов и полимерных композитов при проектировании пешеходных мостов и путепроводов. Стандарт разработан с учетом основных нормативных положений «Рекомендаций 96. Применение пластмасс, армированных волокном в несущих конструкциях зданий и сооружений», разработанных Центром исследований и нормирования в гражданском строительстве в Европейском Союзе в 2003 г.

¹⁸ ГОСТ 25.603-82 Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания на растяжение кольцевых образцов при нормальной, повышенной и пониженной температурах — М.: Стандартинформ, 2005. — 12 с.

¹⁹ ГОСТ 25.604-82 Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания на изгиб при нормальной, повышенной и пониженной температурах — М.: Стандартинформ, 2005. — 7 с.

²⁰ ГОСТ Р 54928-2012 Пешеходные мосты и путепроводы из полимерных композитов. Технические условия — М.: Стандартинформ, 2015. — 54 с.

В 2014 г. был разработан межгосударственный стандарт ГОСТ 33119-2014 «Конструкции полимерные композитные для пешеходных мостов и путепроводов. Технические условия».²¹ Настоящий стандарт устанавливает технические требования к следующим конструкциям: пролетным строениям, сходам, настилам, водоотводным лоткам, перилам и конструкциям светопрозрачных галерей, изготовленным пултрузией, инфузией, вакуумной инфузией и др. Нормативный документ включает в себя требования к физико-механическим свойствам полимерных композитных конструктивных элементов и методам контроля свойств материала, а также требования к особенностям расчета и конструирования таких элементов при проектировании пешеходных мостов и путепроводов.

В 2015 г. появился стандарт, устанавливающий термины и определения понятий в области производства и применения полимерных композитов (ПК) — ГОСТ 32794-2014 «Композиты полимерные. Термины и определения (с Поправкой)».²² Установленные в стандарте термины расположены в систематизированном порядке, отражающем систему понятий в области полимерных композитов (ПК). Для каждого понятия установлен один стандартизованный термин.

В 2015 г. появился ряд межгосударственных стандартов, регламентирующих методы испытаний полимерных композитов:

- ГОСТ 32659-2014 (ISO 14130:1997) «Композиты полимерные. Методы испытаний. Определение кажущегося предела прочности при межслойном сдвиге методом испытания короткой балки».²³ Технические требования документа распространяются на композиты полимерные, а именно многослойные термопласты или реактопласты, армированные сбалансированно и симметрично расположенными относительно средней плоскости образца волокнами, и устанавливают метод определения кажущегося предела прочности при межслойном сдвиге. В документе представлена сущность метода, необходимое оборудование, подготовка к проведению испытания, процесс испытания и обработка результатов.

- ГОСТ 32656-2014 (ISO 527-4:1997, ISO 527-5:2009) «Композиты полимерные. Методы испытаний. Испытания на растяжение»²⁴,

²¹ ГОСТ 33119-2014 Конструкции полимерные композитные для пешеходных мостов и путепроводов. Технические условия — М.: Стандартинформ, 2015. — 32 с.

²² ГОСТ 32794-2014 Композиты полимерные. Термины и определения (с Поправкой) — М.: Стандартинформ, 2015. — 98 с.

²³ ГОСТ 32659-2014 (ISO 14130:1997) Композиты полимерные. Методы испытаний. Определение кажущегося предела прочности при межслойном сдвиге методом испытания короткой балки — М.: Стандартинформ, 2014. — 19 с.

²⁴ ГОСТ 32656-2014 (ISO 527-4:1997, ISO 527-5:2009) Композиты полимерные. Методы испытаний. Испытания на растяжение — М.: Стандартинформ, 2014. — 38 с.

распространяющийся на изотропные, ортотропные, а также на однонаправленно армированные полимерные композиты, и устанавливающий требования к методам определения их механических свойств при растяжении: предела прочности, модуля упругости, коэффициента Пуассона. Под изотропными ПКМ понимаются реактопласты и термопласты, армированные хаотически расположенными рублеными волокнами, в том числе в виде матов из рубленых нитей и ровингов. Под ортотропными ПКМ понимаются реактопласты и термопласты, армированные волокнами, тканями различных структур, а также их комбинациями при условии, что в процессе изготовления композитного материала была обеспечена ортогональная ориентация волокон. Под однонаправленно армированными ПКМ в настоящем стандарте понимаются реактопласты и термопласты, армированные однонаправленными комплексными нитями, ровингами, лентами, тканями, волокна в которых ориентированы только в одном направлении. Содержание стандарта аналогично приведенному выше.

- ГОСТ 32657-2014 (ISO 75-1:2013, ISO 75-3:2004) «Композиты полимерные. Методы испытаний. Определение температуры изгиба под нагрузкой (с Изменением N 1, с Поправкой)».²⁵ Стандарт распространяется на полимерные композиты, а именно многослойные реактопласты (далее — ламинаты), а также пластмассы, армированные волокном длиной не менее 7,5 мм. Документ устанавливает метод испытания, при котором образец подвергают трехточечному изгибу при равномерном повышении температуры и измеряют ее значение, при котором возникает стандартный прогиб, соответствующий установленному увеличению напряжения при изгибе. Содержание документа аналогично предыдущим.

- ГОСТ 32658-2014 (ISO 14129:1997) «Композиты полимерные. Определение механических характеристик при сдвиге в плоскости армирования методом испытания на растяжение под углом ± 45 град»²⁶, распространяющийся на многослойные полимерные композиты с термопластичной или термореактивной матрицей, однонаправленно армированные слои которых расположены сбалансированно и симметрично относительно средней плоскости образца и под углом $\pm 45^\circ$ к оси образца. Стандарт устанавливает метод определения механических характеристик (напряжение при сдвиге в плоскости армирования, предел прочности при сдвиге в плоскости армирования, модуль сдвига, деформация сдвига) при сдвиге в плоскости армирования методом

²⁵ ГОСТ 32657-2014 (ISO 75-1:2013, ISO 75-3:2004) Композиты полимерные. Методы испытаний. Определение температуры изгиба под нагрузкой (с Изменением N 1, с Поправкой) — М.: Стандартинформ, 2018. — 20 с.

²⁶ ГОСТ 32658-2014 (ISO 14129:1997) Композиты полимерные. Определение механических характеристик при сдвиге в плоскости армирования методом испытания на растяжение под углом ± 45 град. — М.: Стандартинформ, 2014. — 15 с.

испытания на растяжение под углом $\pm 45^\circ$. Содержание документа аналогично приведенным выше стандартам, регламентирующим методы испытаний.

- ГОСТ 32659-2014 (ISO 14130:1997) «Композиты полимерные. Методы испытаний. Определение кажущегося предела прочности при межслойном сдвиге методом испытания короткой балки»²⁷, который устанавливает метод определения кажущегося предела прочности при межслойном сдвиге. Нормативный документ распространяется на многослойные термопласты или реактопласты (ламинаты), армированные сбалансированно и симметрично расположенными относительно средней плоскости образца волокнами. Содержание документа аналогично приведенным выше стандартам, регламентирующим методы испытаний.

В 2017 г. введен в действие ГОСТ Р 56785-2015 «Композиты полимерные. Метод испытания на растяжение плоских образцов»²⁸, устанавливающий метод испытания полимерных композитных материалов, армированных углеродными, борными, органическими и другими высокопрочными волокнами на растяжение.

ГОСТ 33376-2015 «Секции настилов композитные полимерные для пешеходных и автодорожных мостов и путепроводов. Общие технические условия (Переиздание)»²⁹, введен в действие в 2017 г. Стандарт распространяется на композитные полимерные секции настилов для пешеходных и автодорожных мостов и путепроводов, возводимых на автомобильных дорогах всех категорий, включая внутрихозяйственные дороги сельскохозяйственных и промышленных предприятий. В документе отражены технические требования, требования безопасности, требования к охране окружающей среды, правила приемки, методы контроля и испытаний, транспортирование и хранение и др.

В 2007 году Научно-производственным предприятием «АПАТЭК» был разработан СТО 39790001.03-2007 «Дороги автомобильные общего пользования. Пешеходные мосты и путепроводы. Конструкции дорожно-строительные из композиционных материалов. Технические требования».³⁰ Стандарт организации устанавливает технические

²⁷ ГОСТ 32659-2014 (ISO 14130:1997) Композиты полимерные. Методы испытаний. Определение кажущегося предела прочности при межслойном сдвиге методом испытания короткой балки — М.: Стандартинформ, 2014. — 19 с.

²⁸ ГОСТ Р 56785-2015 Композиты полимерные. Метод испытания на растяжение плоских образцов — М.: Стандартинформ, 2016. — 20 с.

²⁹ ГОСТ 33376-2015 Секции настилов композитные полимерные для пешеходных и автодорожных мостов и путепроводов. Общие технические условия (Переиздание) — М.: Стандартинформ, 2019. — 30 с.

³⁰ СТО 39790001.03-2007 Дороги автомобильные общего пользования. Пешеходные мосты и путепроводы. Конструкции дорожно-строительные из композиционных материалов. Технические требования — М.: ООО НПП «АПАТЭК», 2007. — 91 с.

требования, параметры и характеристики к несущим конструкциям пешеходных мостов и путепроводов (временные и постоянные сооружения) из слоистых стеклопластиков типа СППС (стеклопластик профильный пултрузионный строительный), требования к методам испытаний, контроля и эксплуатации стеклопластиковых конструкций. СППС является продукцией предприятия «АпАТэК» и представляет собой материал, состоящий из стекловолокна, пропитанного термореактивным связующим, и предназначен для использования в строительстве взамен традиционных материалов (стали, железобетона, дерева).

В 2012 году компанией ООО «Рускомполит» был разработан и введен в действие СТО 00204961-004-2012 «Пешеходные мосты и путепроводы из полимерных композитов. Технические условия».³¹ Этот стандарт распространяется на несущие конструкции и другие конструктивные элементы пешеходных мостов и путепроводов (временных и постоянных) из полимерных композитов, изготавливаемые по технологии вакуумной инфузии. В нем устанавливаются технические требования, предъявляемые к конструктивным элементам пешеходных мостов и путепроводов из полимерных композитов, требования к полимерным композитам, требования к методам контроля при определении показателей и характеристик конструктивных элементов и полимерных композитов, а также общие требования к расчетам конструктивных элементов и полимерных композитов при проектировании пешеходных мостов и путепроводов.

Саморегулируемая организация некоммерческое партнерство «МОД «СОЮЗДОРОСТРОЙ» выпустила СТО НОСТРОЙ 2.25.112-2013 «Мостовые сооружения. Строительство деревянных и композитных мостов. Часть 2. Сооружение пешеходных мостов из полимерных композитных материалов»³² в 2013 г. Стандарт распространяется на строительство пешеходных мостов из полимерных композитных материалов. Устанавливает правила производства работ по сооружению мостов с конструктивными элементами (преимущественно из пултрузионных профилей), изготовленных из полимерных композитных материалов, и контроль их выполнения.

ОДМ 218.3.061-2015 «Рекомендации по применению композитных конструкций и материалов с параметрами горючести «НГ» для объектов

³¹ СТО 00204961-004-2012 Пешеходные мосты и путепроводы из полимерных композитов. Технические условия — М.: ООО УК РУСКОМПОЗИТ, 2012. — 53 с.

³² СТО НОСТРОЙ 2.25.112-2013 «Мостовые сооружения. Строительство деревянных и композитных мостов. Часть 2. Сооружение пешеходных мостов из полимерных композитных материалов — М.: Издательство «БСТ», 2013. — 53 с.

транспортной инфраструктуры».³³ В нем установлены рекомендации по применению композитных конструкций и материалов с параметрами горючести «НГ» при проектировании, строительстве и эксплуатации объектов транспортной инфраструктуры, в том числе надземных и подземных пешеходных переходов. В методическом документе рассмотрены области применения композитных материалов с параметрами горючести «НГ», однако применение данных материалов в других областях настоящим документом не исключается.

ОДМ 218.2.058-2019 «Рекомендации по применению композиционных материалов в конструкциях мостовых сооружений и пешеходных мостов».³⁴ Методический документ содержит рекомендации по проектированию, строительству и эксплуатации пролетных строений мостовых сооружений и удерживающих пешеходных ограждений из полимерных композиционных материалов и распространяется на конструкции из цельнокомпозитных балочных пролетных строений и ферм из ПКМ.

В 2019 г. авторским коллективом были выпущены методические рекомендации по расчету мостовых пролетных строений с применением композитных материалов.³⁵ В них изложена информация о материалах, назначаемых при проектировании композитных пролетных строений, требования к назначению коэффициентов надежности расчетных характеристик композитного материала, нагрузки и воздействия, особенности конструктивных решений, расчетные схемы. Кроме того, в них содержатся формулы для расчёта по прочности и устойчивости сечений композитных конструктивных элементов, для расчета соединений и их узлов, для расчета прогибов. Также документ включает себя экспериментальные методы определения свойств полимерного композитного материала пролетных строений для подтверждения его качества. Рекомендации разработаны в развитие положений СП 35.13330.2011 «СНиП 2.05.03-84* Мосты и трубы»³⁶, а также для практической реализации требований нормативных документов в области проектирования полимерных композитных пролетных строений мостов различного типа. Отмечается, что документ следует использовать при

³³ ОДМ 218.3.061-2015 «Рекомендации по применению композитных конструкций и материалов с параметрами горючести «НГ» для объектов транспортной инфраструктуры — М.: Федеральное дорожное агентство, 2015. — 47 с.

³⁴ ОДМ 218.2.058-2019 «Рекомендации по применению композиционных материалов в конструкциях мостовых сооружений и пешеходных мостов — М.: Стандартинформ, 2019. — 86 с.

³⁵ Методические рекомендации по расчету мостовых пролетных строений с применением композитных материалов / Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации — М.: 2019. — 89 с.

³⁶ ГОСТ 33119-2014 Конструкции полимерные композитные для пешеходных мостов и путепроводов. Технические условия — М.: Стандартинформ, 2015. — 32 с.

расчетах для проектирования полимерных композитных пролетных строений пешеходных мостов.

Существуют технические условия ТУ 5772-001-11567537-2007 «Конструкции пешеходных мостов из композиционных материалов»³⁷, которые преимущественно содержат сведения о подходах к расчету и конструированию пешеходных мостов из полимерных композитных материалов.

«Временные Технические Условия на проектирование и технологию изготовления пешеходных мостов из композитных материалов», введенные в 2001 г. Министерством путей и сообщений России.

Необходимо отметить отсутствие в СП 35.13330.2011 «Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84* (с Изменениями N 1, 2, 3)» [и СП 46.13330.2012 «Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 3.06.04-91 (с Изменениями N 1, 2, 3, 4)»]³⁸ положений, которые устанавливают требования к расчетам при проектировании конструктивных элементов пролетных строений мостов из ПКМ.

Отсутствуют книги, справочные пособия по проектированию конструкций с применением полимерных композиционных материалов, тем более учебники и пособия для подготовки специалистов по применению полимерных композиционных материалов в транспортном строительстве

Conclusions

Выводы

1. Использование ПКМ в мостостроении является перспективным направлением для изучения, однако для того, чтобы обеспечивать безопасность, долговечность и надежность таких сооружений, необходимо проведение ряда экспериментальных и теоретических исследований, а также постоянный мониторинг элементов конструкций при эксплуатации существующих мостов из ПКМ.
2. Несмотря на многолетний опыт применения ПКМ в строительстве, отмечается отсутствие единого подхода при проектировании и строительстве полимерных композитных мостов, а также потенциальные риски их эксплуатации.

³⁷ ТУ 5772-001-11567537-2007 Конструкции пешеходных мостов из композиционных материалов — М.: Стандартинформ, 2007.

³⁸ СП 46.13330.2012 «Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 3.06.04-91 (с Изменениями N 1, 2, 3, 4) — М.: Минрегион России, 2011. — 145 с.

Пролетные строения из полимерных композитных материалов для автодорожных мостов являются конструкциями индивидуального проектирования.

3. Отсутствие в настоящее время в РФ утвержденной к применению нормативной документации по проектированию и строительству пролетных строений автодорожных мостов из ПКМ требует разработки специальных технических условий (СТУ).
4. Для внедрения в практику проектирования и строительства пролетных строений автодорожных мостов из ПКМ необходимо исследование свойств материалов, узлов, опытных образцов пролетных строений мостов для проведения статических, динамических и других испытаний.

ЛИТЕРАТУРА

1. Систематизация и анализ нормативно технической документации по применению полимерных композиционных материалов в транспортном строительстве. Часть 1 / И.И. Овчинников, И.Г. Овчинников, Е.Д. Ильченко, Е.С. Михалдыкин // Наукоедение. — 2017. — Т 9. — № 1. — С. 32TVN117. — URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/32TVN117.pdf>. — EDN YMXOUV. (дата обращения: 14.01.2024).
2. Систематизация и анализ нормативно технической документации по применению полимерных композиционных материалов в транспортном строительстве. Часть 2 / И.И. Овчинников, И.Г. Овчинников, Е.Д. Ильченко, Е.С. Михалдыкин // Наукоедени. — 2017. — Т 9. — № 1. — С. 45TVN117. — URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/45TVN117.pdf>. — EDN YMXOZV. (дата обращения: 14.01.2024).
3. **Groenier, J.S.** A Guide to Fiber-Reinforced Polymer Trail Bridges / J.S. Groenier, M. Eriksson, S. Kosmalski. — Миссула: USDA Forest Service, 2006. — 92 с. — URL: <https://www.fs.usda.gov/t-d/pubs/pdfpubs/pdf06232824/pdf06232824dpi72pt01.pdf> (дата обращения: 27.10.2023).
4. **Bank, L.C.** Application of FRP Composites to Bridges in the USA / L.C. Bank. — DOI // Proceedings of the International Colloquium on Application of FRP to Bridges, Tokyo, JAPAN, January 20, 2006 / Токио: Japan Society of Civil Engineers (JSCE), 2006. — URL: https://www.researchgate.net/publication/234094998_Application_of_FRP_Composites_to_Bridges_in_the_USA. (дата обращения: 14.01.2024).
5. **GangaRao, H.** Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composite Bridges in West Virginia / H. GangaRao, M. Skidmore. — Моргантаун: West Virginia University, 2017. — 53 с. — URL: <https://cee.statler.wvu.edu/files/d/497e4726-93e8-4e92-8493-2beff19d5ac0/frp-bridgesin-wv-2-2-17.pdf> (дата обращения: 27.10.2023).
6. **Mufti, A.A.** Recent Bridge Applications of FRPs in Canada / A.A. Mufti, P. Labossière, K.W. Neale. — DOI <https://doi.org/10.2749/101686602777965513> // Structural Engineering International. — 2018. — Т 12. — № 2. — С. 96–98. — URL: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.2749/101686602777965513>. (дата обращения: 14.01.2024).
7. **Canning, L.** Structural monitoring and 8-year load test on Europe's first fibre-reinforced polymer highway bridge / L. Canning, S. Luke, P. Brown. — DOI <https://doi.org/10.1680/bren.11.00041> // Bridge Engineering. — 2015. — Т 168. — № 1. — С. 24–29. — URL: <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/10.1680/bren.11.00041>. (дата обращения: 14.01.2024).
8. **Mara, V.** Review of FRP decks: structural and in-service performance / V. Mara, R. Haghani. — DOI <https://doi.org/10.1680/bren.14.00009> // Bridge Engineering. — 2015. — Т 168. — № 4. — С. 308–329. — URL: <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/10.1680/bren.14.00009>. (дата обращения: 29.01.2024).

9. **Qureshi, J.** A Review of Fibre Reinforced Polymer Bridges / J. Qureshi. — DOI <https://doi.org/10.3390/fib11050040> // Fibers. — 2023. — Т 11. — № 5. — С. 40. — URL: <https://www.mdpi.com/2079-6439/11/5/40>. (дата обращения: 21.01.2024).
10. FRP in China: the state of FRP research, design guidelines and application in construction / L.P. Ye, P. Feng, X.Z. Lu, P. Qian [и др.] // 2nd International Conference on FRP Composites in Civil Engineering / Лейден: A.A. Balkema Publishers, 2004. — С. 109–119. — URL: https://www.researchgate.net/publication/242599545_FRP_in_China_the_state_of_FRP_research_design_guidelines_and_application_in_construction. (дата обращения: 24.01.2024).
11. **Tang, L.** Maintenance and Inspection of Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bridges: A Review of Methods / L. Tang. — DOI <https://doi.org/10.3390/ma14247826> // Materials. — 2021. — Т 14. — № 24. — С. 7826. — URL: <https://www.mdpi.com/1996-1944/14/24/7826>. (дата обращения: 27.10.2023).
12. **Dilek, U.** 4 — Condition assessment of concrete structures / U. Dilek. — DOI <https://doi.org/10.1533/9781845697037.1.84> // Failure, Distress and Repair of Concrete Structures / Бока-Ратон: CRC Press, 2009. — С. 84–137. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B978184569408150004X>. (дата обращения: 29.01.2024).
13. **Nakamura, S.** Guidelines for Design and Construction of Fibre-Reinforced Polymer Footbridges in Japan / S. Nakamura, S. Yamada, K. Sugiura, I. Nishizaki. — DOI <https://doi.org/10.2749/101686612X13291382990804> // Structural Engineering International. — 2012. — Т 22. — № 2. — С. 250–253. — URL: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.2749/101686612X13291382990804>. (дата обращения: 29.01.2024).
14. **Иванов, А.Н.** Проблемы применения полимерных композиционных материалов в несущих конструкциях железнодорожных мостов / А.Н. Иванов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. — 2020. — № 3. — С. 29–37. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44109353>. — EDN NMZLHC. (дата обращения: 20.10.2023).

Сведения об авторах:

Ерофеев Михаил Николаевич — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Мосты и тоннели», ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», Москва, Россия, e-mail: kventr@list.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1048-3574>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=836604
WoS: <https://www.webofscience.com/wos/author/rid/Q-4553-2017>
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=6701806693>

Рыбаков Сергей Викторович — аспирант, ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», Москва, Россия, e-mail: Rybakov.sv@bk.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-0810-7994>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1178306

Ибрагимова Ания Айратовна — аспирант, ФГБОУ ВО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет», Казань, Россия, e-mail: anyaia13@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1875-8771>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1172486
WoS: <https://www.webofscience.com/wos/author/rid/KAM-4675-2024>
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=58700190000>
ResearchGate: <https://www.researchgate.net/scientific-contributions/Aniia-Ibragimova-2196665512>

Овчинников Игорь Георгиевич — доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, профессор базовой кафедры «АО Мостострой-11», ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, Россия, профессор кафедры «Автомобильные дороги и мосты», ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Пермь, Россия, e-mail: bridgesar@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0617-3132>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=2922
WoS: <https://www.webofscience.com/wos/author/rid/J-5539-2013>
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=7102605749>

Лукашкин Сергей Анатольевич — доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры «Прочности конструкций», ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева-КАИ», Казань, Россия, профессор кафедры «Теоретической механики», ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», Казань, Россия, e-mail: lukankin.sergej@yandex.ru

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=10110

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=6507580592>

Овчинников Илья Игоревич — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Транспортное строительство», ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», Саратов, Россия, доцент Базовой кафедры «АО Мостострой-11», ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, Россия, e-mail: bridgeart@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8370-297X>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=177132

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57191523104>

Пискунов Александр Алексеевич — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Мосты и тоннели», ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», Москва, Россия, e-mail: a.piskunov52@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5444-8415>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=807388

Мазур Евгений Витальевич — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Мосты и тоннели», ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», Москва, Россия, e-mail: genha345@mail.ru

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1161926

Статья получена: 10.03.2024. Принята к публикации: 14.05.2024. Опубликовано онлайн: 28.05.2024.

REFERENCES

1. Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Ilchenko E.D., Mikhaldykin E.S. Systematization and analysis of normative and technical documentation on the use of polymer composites in transport construction. Part 1. *Naukovedenie*. 2017;9(1): 32TVN117. Available at: <https://naukovedenie.ru/PDF/32TVN117.pdf> (accessed 14th January 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
2. Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Ilchenko E.D., Mikhaldykin E.S. Systematization and analysis of normative and technical documentation on the use of polymer composites in transport construction. Part 2. *Naukovedenie*. 2017;9(1): 45TVN117. Available at: <https://naukovedenie.ru/PDF/45TVN117.pdf> (accessed 14th January 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
3. Groenier J.S., Eriksson M., Kosmalski S. A Guide to Fiber-Reinforced Polymer Trail Bridges. Missoula: USDA Forest Service; 2006. Available at: <https://www.fs.usda.gov/t-d/pubs/pdfpubs/pdf06232824/pdf06232824dpi72pt01.pdf> (accessed 27th October 2023). (In Eng.).
4. Bank L.C. Application of FRP Composites to Bridges in the USA. In: Proceedings of the International Colloquium on Application of FRP to Bridges, Tokyo, JAPAN, January 20, 2006. Tokyo: Japan Society of Civil Engineers (JSCE); 2006. p. Available at: https://www.researchgate.net/publication/234094998_Application_of_FRP_Composites_to_Bridges_in_the_USA (accessed 14th January 2024). (In Eng.).
5. GangaRao H., Skidmore M. Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composite Bridges in West Virginia. Morgantown: West Virginia University; 2017. Available at: <https://cee.statler.wvu.edu/files/d/497e4726-93e8-4e92-8493-2beff19d5ac0/frp-bridgesin-wv-2-2-17.pdf> (accessed 27th October 2023). (In Eng.).
6. Mufti, A.A., Labossière, P., & Neale, K.W. Recent Bridge Applications of FRPs in Canada. *Structural Engineering International*. 2018;12(2): 96–98. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.2749/10168660277965513>.
7. Canning L., Luke S., Brown P. Structural monitoring and 8-year load test on Europe's first fibre-reinforced polymer highway bridge. *Bridge Engineering*. 2015;168(1): 24–29. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1680/bren.11.00041>.

8. Mara V., Haghani R. Review of FRP decks: structural and in-service performance. *Bridge Engineering*. 2015;168(4): 308–329. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1680/bren.14.00009>.
9. Qureshi J. A Review of Fibre Reinforced Polymer Bridges. *Fibers*. 2023;11(5): 40. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3390/fib11050040>.
10. Ye L.P., Feng P., Lu X.Z., Qian P. et al. FRP in China: the state of FRP research, design guidelines and application in construction. In: 2nd International Conference on FRP Composites in Civil Engineering. Leiden: A.A. Balkema Publishers; 2004. p. 109–119. Available at: https://www.researchgate.net/publication/242599545_FRP_in_China_the_state_of_FRP_research_design_guidelines_and_application_in_construction (accessed 24th January 2024). (In Eng.).
11. Tang L. Maintenance and Inspection of Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bridges: A Review of Methods. *Materials*. 2021;14(24): 7826. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14247826>.
12. Dilek U. 4 — Condition assessment of concrete structures. In: Failure, Distress and Repair of Concrete Structures. Boca Raton: CRC Press; 2009. p. 84–137. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B978184569408150004X> (accessed 29th January 2024). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1533/9781845697037.1.84>.
13. Nakamura S., Yamada S., Sugiura K., Nishizaki I. Guidelines for Design and Construction of Fibre-Reinforced Polymer Footbridges in Japan. *Structural Engineering International*. 2012;22(2): 250–253. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.2749/101686612X13291382990804>.
14. Ivanov A.N. Problems of the Use of Polymer Composite Materials in The Supporting Structures of Railway Bridges. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2020;(3): 29–37. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44109353> (accessed 20th October 2023). (In Russ., abstract in Eng.).

Information about the authors:

Mikhail N. Erofeev — Russian University of Transport, Moscow, Russia, e-mail: kventr@list.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1048-3574>

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=836604

WoS: <https://www.webofscience.com/wos/author/rid/Q-4553-2017>

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=6701806693>

Sergey V. Rybakov — Russian University of Transport, Moscow, Russia, e-mail: Rybakov.sv@bk.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-0810-7994>

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1178306

Aniia A. Ibragimova — Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russia, e-mail: anyia13@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1875-8771>

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1172486

WoS: <https://www.webofscience.com/wos/author/rid/KAM-4675-2024>

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=58700190000>

ResearchGate: <https://www.researchgate.net/scientific-contributions/Aniia-Ibragimova-2196665512>

Igor G. Ovchinnikov — Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia, e-mail: bridgesar@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0617-3132>

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=2922

WoS: <https://www.webofscience.com/wos/author/rid/J-5539-2013>

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=7102605749>

Sergei A. Lukankin — Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI, Kazan, Russia, Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russia, e-mail: lukankin.sergej@yandex.ru

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=10110

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=6507580592>

Ilya I. Ovchinnikov — Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia, Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia, e-mail: bridgeart@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8370-297X>

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=177132

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57191523104>

Alexander A. Piskunov — Russian University of Transport, Moscow, Russia, e-mail: a.piskunov52@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5444-8415>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=807388

Evgeny V. Mazur — Russian University of Transport, Moscow, Russia, e-mail: genha345@mail.ru
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1161926

Submitted: 10th March 2024. Revised: 14th May 2024. Published online: 28th May 2024.