

УДК 678.747.2:620.1

А.А. Евдокимов<sup>1</sup>, Э.Ш. Имаметдинов<sup>1</sup>, С.С. Малаховский<sup>1</sup>**УСИЛЕНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ БЕТОНА СИСТЕМОЙ ВНЕШНЕГО АРМИРОВАНИЯ ИЗ УГЛЕПЛАСТИКА**

DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-10-73-80

*Описываются результаты научно-исследовательской работы, посвященной усилению бетонных конструкций углеродным армирующим наполнителем со связующим холодного отверждения. В качестве объекта исследований выбраны: бетон марки М-350 и экспериментальный углепластик холодного отверждения на основе эпоксидной матрицы. Исследованы физико-механические характеристики углепластика, а также свойства образцов бетона, внешне армированного углепластиком после проведения натурной экспозиции в различных условиях и без нее. Установлено, что прирост прочности усиленных образцов, по сравнению с чисто бетонными образцами, составляет до 550%.*

**Ключевые слова:** углепластик, бетон, упрочнение бетона, система внешнего армирования, экспозиция, растяжение при изгибе.

А.А. Evdokimov<sup>1</sup>, E.Sh. Imametdinov<sup>1</sup>, S.S. Malakhovskiy<sup>1</sup>**STRENGTHENING CONCRETE BUILDING STRUCTURE VIA REINFORCEMENT EXTERNAL SYSTEM FROM CARBON PLASTIC**

*The article describes the results of research work on the reinforcement of concrete structures via carbon reinforcing filler with a cold curing resin. As an object of research were selected: brand of concrete M-350 and experimental cold curing carbon fiber based on an epoxy matrix. The physico-mechanical characteristics of carbon fiber are investigated. The properties of concrete samples externally reinforced with carbon fiber after conducting full-scale exposure in various conditions and without it are investigated. It was established, that strength gain of reinforced samples compared to purely concrete samples is up to 550%.*

**Keywords:** carbon plastic, concrete, concrete hardening, external reinforcement system, exposure, stretch when bending.

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

**Введение**

Обеспечение надежной работы строительных конструкций, зданий и сооружений, долгосрочной и безопасной службы объектов строительства является главной задачей применяемых при изготовлении технологий. Поскольку с каждым годом увеличивается число сооружений жилищного и коммунального фонда, объектов транспортной инфраструктуры, которые находятся в предаварийном и аварийном состояниях, большую актуальность приобретают вопросы их восстановления и реконструкции. Статистика МЧС свидетельствует о том, что в Российской Федерации ежегодно происходит от пяти до десяти обрушений объектов производственного, социально-бытового и другого назначения. В число объектов, рухнувших за последние 20 лет, входят 26 автомобильных мостов и более десятка зданий. Избежать подобных ЧП, а также вернуть в эксплуатацию множество аварийных сооружений позволяют современные методы усиления железобетонных конструкций, одним из которых

является метод усиления бетонных конструкций непрерывными волокнистыми армированными материалами, такими как углепластики [1].

Благодаря сочетанию высоких прочностных характеристик, низкой плотности, технологичности, коррозионной и влагостойкости современные полимерные композиционные материалы (ПКМ) в сфере строительной индустрии являются конкурентоспособными, по сравнению с применяемыми в настоящее время металлическими материалами и железобетонными конструкциями [2, 3]. Развитие перспективных методов и технологий изготовления новых полимерных материалов способствует снижению стоимости изделий, изготовленных из них, что в свою очередь позволяет снизить стоимость их производства [4, 5]. Изготовление конструкций из ПКМ, их эксплуатация, а также ремонт, защита и усиление волокнистыми наполнителями и связующими холодного отверждения уже существующих сооружений (рис. 1) путем создания системы внешнего армирования (СВА) имеют в перспективе большую эффективность, экономическую выгоду и возможность их использования без рисков, связанных с загрязнением окружающей среды.



Рис. 1. Армирование бетонных конструкций углеродной лентой

Изделия строительного назначения, изготовленные из ПКМ, обладают, как правило, низкой плотностью (в ~4 раза легче стальных), что позволяет реализовать монтаж конструкций в течение сокращенного временного интервала без дополнительного использования тяжелой строительной техники, что в свою очередь обеспечивает существенный экономический эффект [6].

Наиболее распространенными связующими для изготовления ПКМ строительного назначения являются полимерные композиции на основе полиэфирных, эпоксивинилэфирных и эпоксидных смол [7, 8]. Данный класс смол способен отверждаться при достаточно низкой (комнатной) температуре без применения дополнительного нагрева, что позволяет использовать их при изготовлении ПКМ в «полевых» условиях.

Большинство работ по разработке композиционных бетонов, армированных углеродным волокном и используемых при строительстве укрепленных сооружений, направлены на внедрение ПКМ в строительную отрасль [9–11]. Примером усиления конструкций при помощи СВА являются проекты применения углепластиков для реконструкции архитектурных построек Италии и Франции [12]. При этом следует учитывать экологические аспекты использования углепластиков в строительной индустрии, в частности воздействие выделения газов в случае пожара [13].

В данной статье представлены результаты исследования механических характеристик образцов исходного бетона и бетона, внешне армированного углепластиком марки ВСЭ-24/ЛР-300. Изучение механических свойств и стойкости

данного композита необходимо для анализа перспектив применения этого материала в строительных конструкциях.

Технология проведения ремонтно-восстановительных работ строительных конструкций с использованием углеродного наполнителя и связующего холодного отверждения может быть востребована для ремонта и усиления мостовых сооружений, эстакад, жилых и промышленных зданий, восстановления несущей способности строительных конструкций, сниженной вследствие коррозии металлической арматуры и разрушения бетона.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 13.2. «Конструкционные ПКМ» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [4, 14, 15].

### Материалы и методы

Объектами исследования являлись образцы, представляющие собой прямоугольные призмы из бетона марки М-350 размерами 270×70×70 мм (для исследования прочности при изгибе) и 70×70×70 мм (для исследования адгезии бетона к углепластику). На часть призм размером 270×70×70 мм с двух и четырех сторон методом контактного формования наносили углепластик на основе эпоксидной смолы марки ВСЭ-24 и безапретной универсальной углеродной ленты типа ЛР-300. Часть призм для сравнения испытывали без нанесенного на их поверхность углепластика. Призмы размером 70×70×70 мм оборачивали углепластиком с четырех сторон. В данном исследовании для изготовления углепластика использовали связующее холодного отверждения марки ВСЭ-24, основу которого составляет эпоксидная диановая смола марки ЭД-20, а в качестве наполнителя – безапретную универсальную углеродную ленту типа ЛР-300 на основе углеродного жгута марки УК-П. Критериями выбора компонентов являлись низкая стоимость связующего и возможность пропитки углеродного наполнителя различными классами связующих холодного отверждения методом контактного формования, что гарантировало широкую применимость исследуемой технологии на реальных объектах строительной инфраструктуры.

Бетонные призмы перед проведением испытаний для полного набора прочности выдерживали в течение 28 суток при температуре 20 °С и влажности 35±5% (при комнатных условиях).

Подготовку поверхности бетона, раскрой углеродного наполнителя, нанесение слоев связующего холодного отверждения и укладку между ними углеродного наполнителя (пропитку наполнителя связующим холодного отверждения) проводили при температуре 15–35 °С и влажности не более 85%; массовая доля связующего в углепластике составляла 45±5%.

### Результаты и обсуждение

Основные физико-механические характеристики (средние значения) экспериментального углепластика холодного отверждения марки ВСЭ-24/ЛР-300 на основе эпоксидной матрицы (далее – углепластик):

Плотность, г/см <sup>3</sup>	1,41
Пористость, %	3,6
Толщина монослоя, мм	0,19
Предел прочности при растяжении (по основе), МПа	1130
Модуль упругости при растяжении (по основе), ГПа	95
Предел прочности при сжатии, МПа	935
Предел прочности при сдвиге в плоскости листа, МПа	50
Продолжительность остаточного горения, с	>60
Длина обугливания, мм	290
Группа дымообразования	V (сильнодымящий)

В соответствии с требованиями, предъявляемыми к строительным конструкциям из ПКМ с точки зрения пожаробезопасности, все материалы должны отвечать нормам СНиП 21-01-97. Поэтому дополнительно исследовали горение (ОСТ1 90094-79) и дымообразование (ГОСТ 24632-81) углепластика. Определили, что продолжительность остаточного горения углепластика >60 с, длина обугливания 290 мм, группа дымообразования V (сильнодымящий). Для предотвращения возможных негативных последствий, связанных с распространением пламени в строительных конструкциях, необходимо наносить на углепластик слой огнезащитного покрытия. В частности, для этих целей хорошо зарекомендовало себя огнезащитное покрытие марки ВЗО-9Х [16].

Из представленных данных видно, что углепластик обладает достаточно высокой прочностью при растяжении и сжатии, однако является горючим. С целью определения прочности межфазного взаимодействия рассмотрели адгезию на границе «бетон-углепластик».

Далее представлены значения прочности при отрыве клеевого соединения бетона с углепластиком по ОСТ1 90069-72 в исходном состоянии, после испытаний в различных климатических зонах (Московский центр климатических испытаний (МЦКИ) и Геленджикский центр климатических испытаний (ГЦКИ) им. Г.В. Акимова) и при разных условиях экспозиции:

Условия экспозиции	Предел прочности при отрыве, МПа, при 20 °С
Исходное состояние	1,8
Тепловлажностное старение в течение 3 мес	2,0
Камера с тропическим климатом в течение, мес:	
1	2,1
3	2,3
Естественное старение (открытая площадка; в течение 3 мес):	
МЦКИ	2,3
ГЦКИ	2,3
Тепловой ресурс (при 80 °С в течение 2000 ч)	1,6

Выявлено незначительное снижение прочности (~11%) после экспозиции при температуре 80 °С в течение 2000 ч, которое объясняется частичной деградацией полимерной матрицы вследствие длительного воздействия повышенной температуры. Во всех остальных случаях наблюдается увеличение показателя прочности при отрыве клеевого соединения бетона с углепластиком относительно исходных значений, что можно объяснить продолжающимися процессами сшивки полимерной матрицы в углепластике. В целом установлено сохранение адгезионных свойств углепластика к бетону на высоком уровне. Внешний вид образцов для исследования адгезионных свойств представлен на рис. 2.

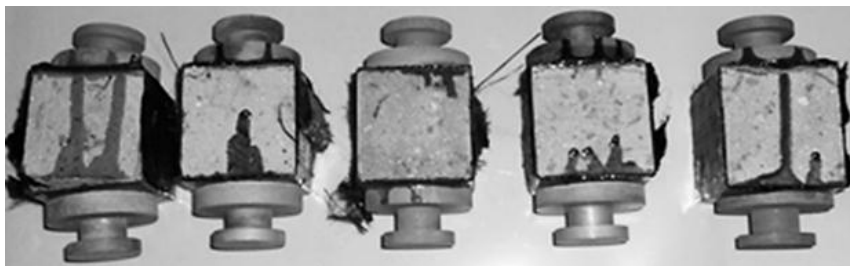


Рис. 2. Вид образцов после испытаний на отрыв клеевого соединения бетона с углепластиком

Физико-механические характеристики образцов бетона, внешне армированного углепластиком по ГОСТ 10180–90 при температуре 20 °С в исходном состоянии, после испытаний в различных климатических зонах (МЦКИ и ГЦКИ) и при разных условиях экспозиции приведены в таблице.

**Прочность при изгибе образцов бетона, армированного углепластиком марки ВСЭ-24/ЛП-300 в исходном состоянии, после испытаний в различных климатических зонах и при разных условиях экспозиции (средние значения)**

Условия экспозиции	Прочность при изгибе, МПа, образцов балок бетона			Прирост прочности*, раз
	без углепластика	с двумя ребрами, армированными углепластиком	с четырьмя ребрами, армированными углепластиком	
Исходное состояние	4,6	16,2	25,2	3,5/5,5
Тепловлажностное старение в течение 3 мес	3,7	13,3	20,5	3,6/5,5
Камера с тропическим климатом в течение, мес:	1	12,4	20,7	2,5/4,1
	3	15,1	23,8	3,4/5,4
Естественное старение (открытая площадка; в течение 3 мес):	МЦКИ	16,1	26,4	5,2/8,5
	ГЦКИ	15,2	28,1	2,8/5,2
Тепловой ресурс (при 80 °С в течение 2000 ч)	4,6	19,0	19,0	4,1/4,1

\* В числителе – значения для образцов, армированных с двух сторон; в знаменателе – с четырех сторон.

Установлено, что выдержка в различных климатических зонах и при разных условиях экспозиции не оказала влияния на внешний вид углепластика (рис. 3). Значения прочности при изгибе образцов в исходном состоянии оказались больше у призм, армированных с двух сторон, по сравнению с неармированными призмами, – в 3,5 раза, а у образцов, армированных с четырех сторон, – в 5,5 раза. Происходило также незначительное увеличение прочности после естественного старения (для образцов, армированных с четырех сторон) по сравнению с прочностью при изгибе образцов в исходном состоянии. Это обусловлено, очевидно, шивкой полимерной матрицы в углепластике под воздействием солнечной радиации и продолжающимся процессом увеличения прочности бетонной смеси в условиях умеренного промышленного и тропического влажного климата [17]. Кроме того, следует отметить, что порядок увеличения прочности у армированных и неармированных образцов сохраняется также и после экспозиции, что свидетельствует о положительном влиянии армирования на бетонные образцы.

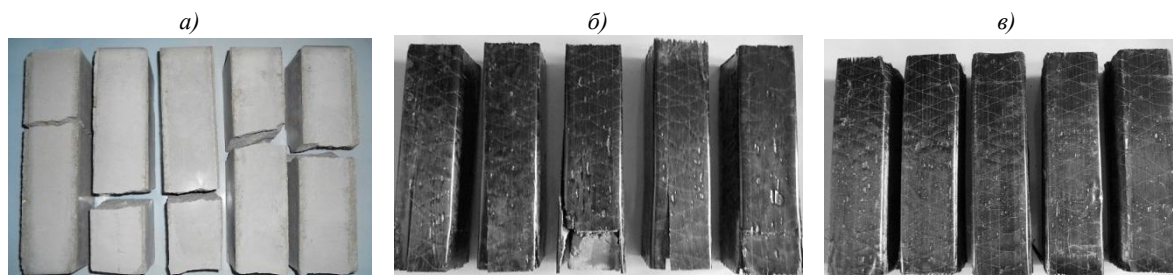


Рис. 3. Образцы бетона без системы внешнего армирования (а), внешне армированные углепластиком с четырех сторон (б), а также после экспозиции при температуре 80 °С в течение 2000 ч перед испытаниями (в)

Наблюдаемое явление увеличения прочности образцов-имитаторов строительных конструкций при обертывании вокруг них обечайки из ПКМ можно объяснить так называемым эффектом «обоймы». Так, в научно-технической литературе отмечается эксперимент, проводимый с бетонными цилиндрами, заключенными в несъемную опалубку из углепластика [18]. Создаваемое в бетоне оболочкой из углепластика пространственно-напряженное состояние (так называемый эффект «обоймы») приводит к повышению несущей способности бетонного ядра, т. е. к увеличению разрушающей нагрузки без увеличения площади сечения (рис. 4). Таким образом, эффект «обоймы» характерен не только для образцов цилиндрической формы, испытанных на сжатие, но и для образцов в виде призмы, испытанных на изгиб.

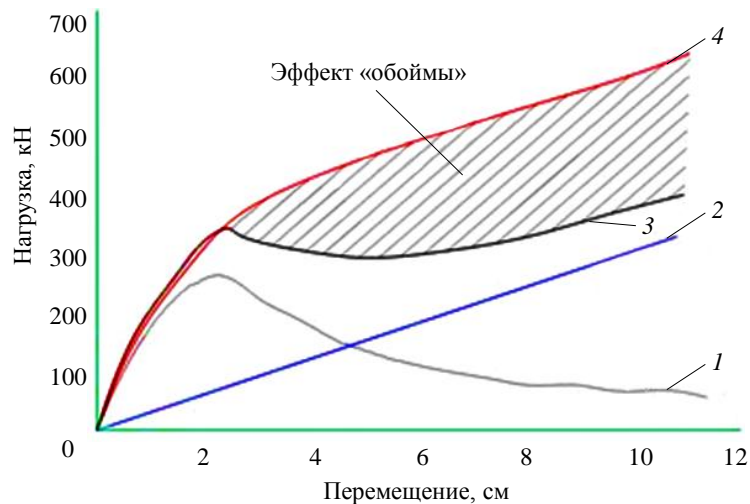


Рис. 4. Диаграмма «напряжение–деформация» у образцов из бетона (1), композитной трубы (2), композитной трубы с бетонным сердечником – математический расчет (3), композитной трубы с бетонным сердечником – данные испытаний (4)

Для исследования защитных свойств внешне армирующего бетон углепластика также проведены испытания на водостойкость. Определили, что за 30 суток экспозиции в воде привес для бетона без армирования составил 6,98%; для бетона, внешне армированного углепластиком, 0,19%. Меньший привес свидетельствует о том, что углепластик работает как защитный слой, снижающий водонасыщение бетона и, как следствие, способствующий повышению несущей способности бетонной конструкции. Увеличение массы самого углепластика составило не более 0,75%, что свидетельствует о его влагостойкости и коррелирует с данными проведенных испытаний на водостойкость. Таким образом, можно наблюдать высокие влагозащитные свойства углепластика применительно к бетонной конструкции.

### **Заключения**

Система внешнего армирования из углепластика, будучи нанесенной на железобетонные строительные конструкции, увеличивает их несущую способность в 5,5 раза (для образцов с нанесением СВА с четырех сторон). Порядок увеличения прочности у образцов с СВА и без нее наблюдается также и после экспозиции, что свидетельствует о положительном влиянии СВА на бетонные образцы. Увеличение прочности бетонных образцов с нанесенной СВА из ПКМ объясняется создаваемым в бетоне при приложении нагрузки на образец с пространственно-напряженным состоянием – эффекта «обоймы», который в свою очередь приводит к увеличению разрушающей нагрузки без увеличения площади сечения.

Установлено, что адгезия исследованных образцов углепластика к бетону составляет 1,8 МПа. Выдержка в различных условиях экспозиции и климатических зонах не оказала существенного влияния на адгезионные свойства (сохранение свойств на уровне 89–100% в зависимости от вида экспозиции). Таким образом, снижение прочности адгезионного соединения «бетон–углепластик» незначительное после влияния эксплуатационных факторов, что свидетельствует о том, что конструкция будет работать длительное время при разных условиях эксплуатации. Экспозиция в воде в течение 30 суток показала, что привес для образцов без СВА составил 6,98%, а для образцов с СВА: 0,19%. Меньший привес свидетельствует о том, что углепластик работает как защитный слой, снижающий водонасыщение бетона и, как следствие, способствующий увеличению его несущей способности, тем самым продлевая срок эксплуатации.

Кроме того, проведенные исследования показали эффективность применения СВА на основе экспериментального углепластика для бетонных строительных конструкций. Использование разработанных материалов и технологии не только может увеличить несущую способность строительных объектов, но также и поможет восстановить объекты, находящиеся в предаварийном состоянии, тем самым увеличив срок их службы. Применение разработанных технологических решений допустимо, в частности, при строительстве и реконструкции опорных сооружений, колонн зданий как квадратного (прямоугольного), так и круглого сечений. Причем возможность значительного увеличения несущей способности рассматриваемых строительных конструкций путем применения СВА позволяет использовать их в более ответственных элементах без увеличения площади их поперечного сечения или же изготавливать конструкции меньшего сечения без изменения величины полезной нагрузки. Это в свою очередь даст возможность сэкономить строительные материалы и минимизировать издержки на строительство или реконструкцию всего сооружения в целом. Потенциальными потребителями разработанной технологии и научно-технической продукции могут быть различные ремонтные и строительные организации.

#### Библиографический список

4. Власенко Ф.С., Раскутин А.Е., Донецкий К.И. Применение плетеных преформ для полимерных композиционных материалов в гражданских отраслях промышленности (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2015. №1. Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.06.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-1-5-5.
5. Донецкий К.И., Караваев Р.Ю., Раскутин А.Е., Панина Н.Н. Свойства угле- и стеклопластиков на основе плетеных преформ // Авиационные материалы и технологии. 2016. №4 (45). С. 54–59. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-4-54-59.
6. Кондрашов С.В., Шашкеев К.А., Петрова Г.Н., Мекалина И.В. Полимерные композиционные материалы конструкционного назначения с функциональными свойствами // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 405–419. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-405-419.
7. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
8. Вешкин А.Е. Технология безавтоклавного формования низкопористых полимерных композиционных материалов и крупногабаритных конструкций из них: дис. ... канд. техн. наук. М.: ВИАМ, 2016. С. 5–15.
9. Евдокимов А.А., Раскутин А.Е., Мишкин С.И., Михалдыкин Е.С. Арочные мосты с применением углепластиковых арочных элементов // Конструкции из композиционных материалов. 2019. №2. С. 22–29.

10. Чурсова Л.В., Раскутин А.Е., Гуревич Я.М., Панина Н.Н. Связующее холодного отверждения для строительной индустрии // Клеи. Герметики. Технологии. 2012. №5. С. 40–44.
11. Петрова А.П., Мухаметов Р.Р., Ахмадиева К.Р. Внутренние напряжения в отвержденных полиэфирных связующих для ПКМ // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2019. №5 (77). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 13.07.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-5-12-21.
12. Волкова А.А., Пайков А.В., Столяров О.Н. Структура и свойства текстильно-армированного бетона // Инженерно-строительный журнал. 2015. №7 (59). С. 50–56.
13. Гайнанов Д.Г., Сизов А.Г., Филиппов Ю.Н. Усиление железобетонных строительных конструкций углеродным волокном // Экспертиза промышленной безопасности и диагностика опасных производственных объектов. 2015. №4. С. 107–108.
14. Башжанов А.Е. Применение инновационных композитных материалов в усиление железобетонных элементов конструкций // Наука, техника и образование. 2015. №4. С. 117–119.
15. Разработка и использование системы внешнего армирования углеродными полимерными волокнами для железобетонных конструкций. URL: <https://afzir.com/wp-content/uploads/2017/11/Externally-bonded-FRP-Reinforcement-for-RC-structures.pdf> (дата обращения: 01.07.2020).
16. Барботько С.Л. Развитие методов оценки пожаробезопасности материалов авиационного назначения // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 516–526. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-516-526.
17. Каблов Е.Н. Тенденции и ориентиры инновационного развития России: сб. науч.-информ. материалов. 3-е изд. М.: ВИАМ, 2015. 720 с.
18. Каблов Е.Н. Композиты: сегодня и завтра // Металлы Евразии. 2015. №1. С. 36–39.
19. Венедиктова М.А., Краснов Л.Л., Кирина З.В. Некоторые аспекты применения огнезащитных покрытий (обзор) // Новости материаловедения. Наука и техника: электрон. науч.-техн. журн. 2018. №1. Ст. 2. URL: <http://www.materialsnews.ru> (дата обращения: 25.06.2020).
20. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Системный анализ влияния климата на механические свойства полимерных композиционных материалов по данным отечественных и зарубежных источников (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2018. №2 (51). С. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58.
21. Мишкин С.И., Раскутин А.Е., Евдокимов А.А., Гуляев И.Н. Технологии и основные этапы строительства первого в России арочного моста из композиционных материалов // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2017. №6 (54). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.06.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-6-5-5.