Интернет-журнал «Транспортные сооружения» https://t-s.today
Russian journal of transport engineering

2019, №4, Том 6 / 2019, No 4, Vol 6 https://t-s.today/issue-4-2019.html

URL статьи: https://t-s.today/PDF/09SATS419.pdf

DOI: 10.15862/09SATS419 (http://dx.doi.org/10.15862/09SATS419)

Ссылка для цитирования этой статьи:
Федотов М.Ю., Кошман Н.П., Гусев Б.В., Сперанский А.А., Лоскутов М.Л., Овчинников И.Г., Бокарев С.А., Шелемба И.С., Будадин О.Н., Козельская С.О. Опыт применения композитных систем внешнего армирования и оптического мониторинга строительных сооружений // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2019 №4, https://t-s.today/PDF/09SATS419.pdf (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/09SATS419

For citation:
Fedotov M.Yu., Koshman N.P., Gusev B.V., Speransky A.A., Loskutov M.L., Ovchinnikov I.G., Bokarev S.A., Shelemba I.S., Budadin O.N., Kozel'skaya S.O. (2019). Application experience of composite external reinforcement systems and optical monitoring of building structures. *Russian journal of transport engineering*, [online] 4(6). Available at: https://t-s.today/PDF/09SATS419.pdf (in Russian). DOI: 10.15862/09SATS419

УДК 624.04

Федотов Михаил Юрьевич
Ассоциация строителей России, Москва, Россия
Руководитель проектов
Общероссийская общественная организация «Российская инженерная академия», Москва, Россия
Кандидат технических наук, академический советник
E-mail: fedotovmyu@gmail.com

Кошман Николай Павлович
Ассоциация строителей России, Москва, Россия
Президент
Общероссийская общественная организация «Российская инженерная академия», Москва, Россия
Доктор экономических наук, академический советник
E-mail: info@a-s-r.ru

Гусев Борис Владимирович
Общероссийская общественная организация «Российская инженерная академия», Москва, Россия
Президент
Член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор
E-mail: info-rae@mail.ru

Сперанский Анатолий Алексеевич
Общероссийская общественная организация «Российская инженерная академия», Москва, Россия
Вице-президент по науке и технологическому развитию
Доктор технических наук, профессор
E-mail: vibro-vector@yandex.ru

Лоскутов Максим Леонидович
Ассоциация экспертных организаций в строительстве, Москва, Россия
Директор по развитию
Общероссийская общественная организация «Российская инженерная академия», Москва, Россия
Академический советник
E-mail: m.lloskutoff@gmail.com

Овчинников Игорь Георгиевич
ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, Россия
ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Пермь, Россия
ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», Саратов, Россия
Профессор
Доктор технических наук, профессор
E-mail: bridgesar@mail.ru

Бокарев Сергей Александрович
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения», Новосибирск, Россия
Профессор
Доктор технических наук, профессор
E-mail: bokarevsa@211.ru

Шелемба Иван Сергеевич
ООО «Инверсия-Сенсор», Пермь, Россия
Первый заместитель генерального директора, главный конструктор
Кандидат технических наук
E-mail: shelemba@i-sensor.ru

Будадин Олег Николаевич
АО «ЦНИИСМ», Хотьково, Россия
Начальник отдела технической диагностики и неразрушающего контроля
Общероссийская общественная организация «Российская инженерная академия», Москва, Россия
Академик
Доктор технических наук, профессор
E-mail: Oleg.budadin@yandex.ru

Козельская Софья Олеговна
АО «ЦНИИСМ», Хотьково, Россия
Старший научный сотрудник
Кандидат технических наук
E-mail: kozelskaya.sofik.1977@yandex.ru

Опыт применения композитных систем внешнего армирования и оптического мониторинга строительных сооружений

Аннотация. Приведены результаты широкого применения систем внешнего армирования железобетонных и металлических искусственных сооружений на основе отечественных и зарубежных полимерных композиционных материалов (ПКМ), а также волоконно-оптических систем мониторинга, включающих сеть волоконно-оптических датчиков (ВОД) и аппаратно-программный комплекс, позволяющих отслеживать фактическое состояние объекта контроля на протяжении всего жизненного цикла. Показано, что для железобетонных конструкций целесообразно применять композитные системы внешнего армирования, устанавливаемые непосредственно на объект усиления методом контактного формования с использованием специальных связующих холодного отверждения. Применительно к металлическим конструкциям такая технология неприемлема ввиду значительного различия в коэффициентах линейного температурного расширения металла и углекомпозита. Для решения этой проблемы предложена технология усиления, заключающаяся в установке методом дискретного механического крепления готовых композитных шпренгелей (по аналогии с металлическими), изготавливаемых автоклавными и безавтоклавными методами формования. Установка волоконно-оптических систем мониторинга позволяет дать

объективную оценку технического состояния объекта контроля. В случае обнаружения отклонений от нормативных показателей для данного типа конструкций проводится необходимый комплекс мероприятий по проведению усиления, после чего система мониторинга осуществляет аналогичный контроль, результаты которого характеризуют качество выполненных работ. Таким образом, система мониторинга может выступать как в качестве эффективного инструмента контроля конструкции и осуществлять локальный по времени мониторинг до или после проведения соответствующих работ по усилению и реконструкции, так и в режиме реального времени работать в течение всего периода эксплуатации.

Ключевые слова: полимерный композиционный материал; композитная система внешнего армирования; усиление; мониторинг; волоконно-оптический датчик; железобетонная конструкция; металлическая конструкция

Введение

В настоящее время эксплуатируется большое количество строительных сооружений, построенных в т. ч. в первой половине прошлого века. Очевидно, что к настоящему времени многие из них требуют ремонта, реконструкции или частичной замены отдельных элементов (рисунок 1).

Рисунок 1. *Строительные сооружения с ограничениями по эксплуатации (фото авторов)*

К ним стоит отнести автомобильные и железнодорожные мосты, промышленные здания и сооружения, подъемно-транспортные механизмы, козловые краны, опоры ЛЭП, а также объекты специального назначения.

Говоря о мостовых сооружениях, стоит отметить, что они проектировались и возводились в соответствии с нормативной документацией того периода, и не рассчитаны на современный уровень статических и динамических нагрузок, что напрямую влияет на безопасность эксплуатации.

Из открытых источников известно, что фактический износ мостовых сооружений только применительно к объектам ОАО «РЖД» составляет более 76 % [1].

К характерным видам эксплуатационных повреждений железобетонных [2] и металлических [3] конструкций строительных сооружений, в частности мостов, можно отнести снижение механических характеристик материала несущих конструкций, вызванное усталостью металла и влиянием климатических факторов, коррозионные трещины,

проходящие вдоль арматуры, обводнение бетона, вызванное нарушением гидроизоляции и приводящее к выщелачиванию цементного вяжущего из бетона, сколы и выкрашивание бетона (рисунок 2).

Рисунок 2. *Характерные повреждения бетонных и металлических конструкций (фото авторов)*

Ситуация осложняется тем, что число таких объектов постоянно растет и требует одновременного привлечения немалых ресурсов в ограниченные сроки, что не всегда возможно, как с технической, так и с экономической точки зрения.

Поэтому крайне актуальной задачей является восстановление и повышение несущей способности конструкций до требуемого уровня и оценка их фактического технического состояния с помощью современных методов и средств мониторинга для предотвращения критических и аварийных ситуаций при эксплуатации.

2. Объекты и методы исследований

Традиционные методы усиления, обеспечивающие восстановление эксплуатационных характеристик мостовых сооружений, заключаются в применении металлических накладок, пластин, шпренгельных систем, ферменных конструкций. Такой подход приводит к значительному увеличению собственного веса сооружений и, как следствие, к дополнительным нагрузкам на опоры, что также является сдерживающим фактором, а также ограничению или полной остановке движения транспорта в период проведения ремонтных работ, привлечению тяжеловесной техники, в ряде случаев, организации подъездных путей, что является неэффективным с экономической точки зрения, влечет задержки транспортировки грузов и корректировку пассажиропотока.

К классическим методам диагностики стоит отнести периодический визуальный контроль силами обходчиков, а также электрическую тензометрию. Данные методы имеют существенные недостатки, к которым стоит отнести субъективную оценку фактического состояния конструкции при визуальном осмотре, низкую производительность контроля, необходимость монтажа и демонтажа электрических тензодатчиков при проведении периодического контроля и других регламентных работ. При этом такие системы не позволяют осуществлять контроль в процессе эксплуатации объекта, что напрямую влияет на безопасность эксплуатации, особенно, если речь о мостовых сооружениях, находящихся на значительном удалении от населенных пунктов, прямой доступ к которым затруднен и требует привлечения специализированной техники.

Одним из наиболее перспективных решений данной проблемы является применение комплексной системы, структура которой показана на рисунке 3.

Рисунок 3. *Структура комплексной системы усиления и мониторинга строительных сооружений (составлено авторами)*

Из рисунка 3 видно, что представленная комплексная система включает в себя систему внешнего армирования (СВА) на основе полимерных композиционных материалов (ПКМ), обеспечивающих восстановление несущей способности конструкции, и многоканальную волоконно-оптическую систему мониторинга (ВОСМ) в составе сети волоконно-оптических датчиков (ВОД) на основе волоконных брэгговских решеток (ВБР) и опросного устройства со встроенным специализированным программным обеспечением (СПО), которые позволяют в режиме реального времени обеспечивать контроль фактического технического состояния конструкции в процессе эксплуатации. При этом ВОСМ является частным случаем реализации структурированной системы мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений (СМИС), структура и функционал которой регламентированы ГОСТ Р 22.1.12-2005 [4; 5].

Анализируя мировой опыт стоит отметить, что усиление железобетонных конструкций эффективно осуществлять непосредственно на объекте методом контактного формования ПКМ путем послойного нанесения и прикатывания слоев армирующего наполнителя, пропитанного связующим холодного отверждения. В настоящее время на рынке представлена широкая номенклатура СВА как отечественного, так и зарубежного производства. Среди хорошо зарекомендовавших себя на отечественном и мировом рынке СВА стоит отметить систему FibARM [6; 7] (АО «Препрег-СКМ», с 2018 г. входит в структуру UMATEX, ГК Росатом, РФ), CarbonWrap [8] (ООО «НЦК» совместно с DowAksa Advanced Composites Holdings B.V., США), MasterBrace [9] (BASF SE, Германия), SikaWrap [10] (Sika Group, Германия).

Для усиления металлических конструкций применение СВА на основе ПКМ также целесообразно [11; 12]. Как показывает практика, в ряде случаев эффективно использовать композитные шпренгельные системы, включающие установку готовых ламелей [13; 14] методом дискретного механического крепления на нижний пояс пролетного строения моста, при этом перед установкой возможно предварительное напряжение конструкции. Такой подход позволяет осуществлять усиление без ограничения дорожного движения, дополнительно снимаются ограничения по сезонности проведения работ, что является дополнительным преимуществом.

Системам диагностики строительных сооружений как в РФ, так и за рубежом также уделяется большое внимание. Тут стоит выделить классические акустические и тепловые методы неразрушающего контроля (НК), а также средства электрической тензометрии, которые имеют свои достоинства, однако, как уже упоминалось выше, основным недостатком является невозможность контроля напряженно-деформированного состояния и температуры в режиме реального времени. В качестве наиболее продвинутых технических решений в рассматриваемой области стоит выделить разработки российских компаний ООО «Инверсия-Сенсор», занимающейся разработкой, сертификацией и производством отечественных волоконно-оптических систем мониторинга в строительной, нефтегазовой, энергетической, транспортной и других отраслях промышленности [15; 16], ООО «СОДИС Лаб», осуществляющей проектирование систем мониторинга, антитеррористической защищённости, информационного моделирования (BIM) и разработку СПО [17; 18]. Активно развивается данное направление и за рубежом [19–21].

Композитные СВА и ВОСМ могут применяться как по отдельности, так и в комплексе, при этом стоит отметить, что именно комплексный подход обеспечивает максимальную эффективность.

3. Применение композитных СВА железобетонных мостов

Большое количество исследований по разработке расчётных методик, технологических приемов и нормативной документации различного уровня, а также реализация разработок по усилению железобетонных конструкций автодорожных и железнодорожных мостов проведено под руководством и при непосредственном участии д.т.н., профессора С.А. Бокарева (ФГБОУ ВО СГУПС) и д.т.н., профессора И.Г. Овчинникова (ФГБОУ ВО СГТУ имени Гагарина Ю.А. и ПНИПУ).

Проведено усиление автодорожного моста через ручей на км 0+385 автоподъезда к р.п. Татищево от автомобильной дороги Тамбов-Ртищево-Саратов. Суть этого метода заключается в устройстве на поверхности конструкции высокопрочного внешнего армирования из композитных материалов – углепластиковых накладок и хомутов.

По результатам обследования моста, проведенного в соответствии ВСН 4-81 «Инструкция по проведению осмотров мостов и труб на автомобильных дорогах», было установлено, что присутствует целый ряд повреждений, включая обнажение и коррозию арматуры, выкрашивание бетона, многочисленные сколы. Общая оценка состояния моста составила 2 балла. Внешний вид элементов моста до усиления показан на рисунке 4.

Рисунок 4. *Внешний вид элементов моста до усиления (фото авторов)*

На основании полученного заключения был выполнен расчет действующих нагрузок и в соответствии с «Руководством по усилению железобетонных конструкций композитными материалами» выбран ПКМ, необходимая схема армирования и габариты накладок. Для

проведения усиления был выбран углепластик на основе однонаправленной углеродной ленты УОЛ-30 и двухкомпонентного эпоксидного компаунда АЭ-1. Установка СВА на основе выбранного материала осуществлялась методом контактного формования в растянутой центральной зоне, а также в местах опирания (рисунок 5).

Рисунок 5. *Внешний вид моста после установки композитных СВА (фото авторов)*

Таким образом, СВА устанавливались как в продольном направлении – на действие изгибающего момента, так и в поперечном – на действие поперечной силы. В результате была восстановлена несущая способность моста, что подтверждено результатами соответствующих испытаний [22].

Проведено усиление автодорожного моста через р. Издревая. Предпосылками для усиления стало выявление в столбах промежуточных опор вертикальных трещин раскрытием до 5 мм (рисунок 6).

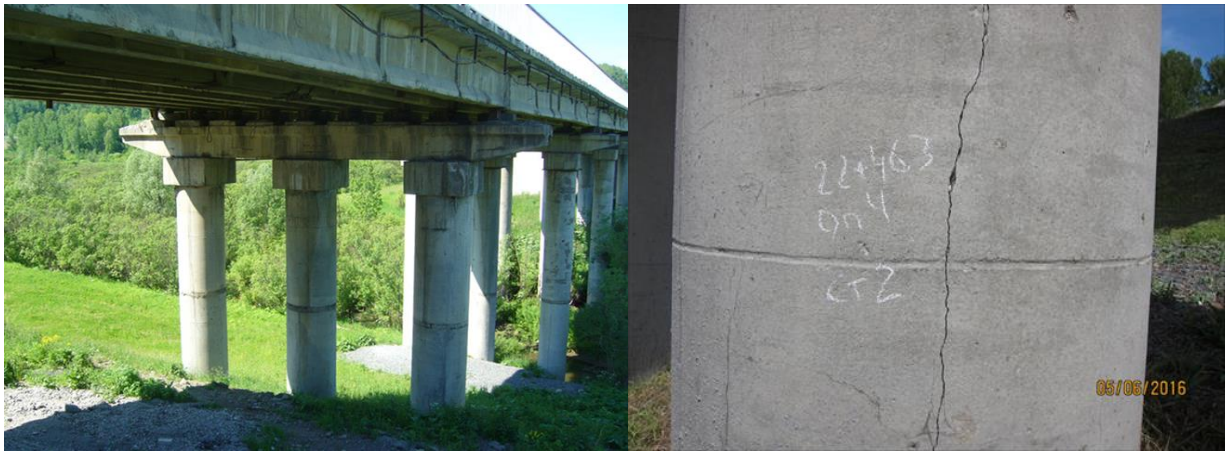

Рисунок 6. *Внешний вид повреждений в опорах моста (фото авторов)*

Промежуточные опоры представляют собой однорядные трехстолбчатые конструкции, объединенные ригелем, диаметр столбов составляет 1,6 м.

Были проведены экспериментальные исследования образцов, разработана методика расчета усиления опор с помощью ПКМ. Схема усиления была принята в виде отдельно стоящих бандажей, установленных с шагом 5 см (рисунок 7).

В качестве материала усиления были использованы холсты из углеродных волокон плотностью 530 г/м^2. Материал усиления – холст BASF MasterBrace FIB CF 230/4900.530g/5.

По результатам проведенных работ грузоподъемность моста была восстановлена.

Рисунок 7. *Внешний вид моста после проведения усиления (фото авторов)*

Результаты экспериментальных и теоретических исследований по изучению совместной работы железобетонных элементов, усиленных ПКМ на основе углеродного волокна, и соответствующие разработанные технологии были применены при выполнении работы по усилению более 10 автодорожных и железнодорожных мостов, расположенных в Московской области, Новосибирской области, Пермском крае, Саратовской области в период 2009–2017 гг. (таблица 1).

Таблица 1

Перечень мостов, усиленных с помощью СВА на основе ПКМ

№ п/п	Наименование объекта усиления	Год
1	Мост через р. Лебяжья, 4+163 км а/д «130 км а/д «М-53» – Тогучин-Карпысак»	2017 г.
2	Мост через р. Колтырак, 141+105 км а/д «Новосибирск – Ленинск-Кузнецкий	2017 г.
3	Мост через р. Издревая, 22+493 км а/д «Новосибирск – Ленинск-Кузнецкий	2017 г.
4	Мост через р. Тарсьма на 138+862 км а/д «Новосибирск – Ленинск-Кузнецкий»	2016 г.
5	Мост через р. Крутелька, 16+344 км а/д «60 км а/д «М-53» – Мошково-Белоярка»	2016 г.
6	Мост через р. Крутелька, 39+508 км а/д «60 км а/д «М-53» – Мошково-Белоярка»	2016 г.
7	Мост через р. Курундус, 0+431 км а/д «14 км а/д «Н-2603» – Пойменное-Пятилетка	2015 г.
8	Мост на 26+600 км участка «Новосибирск Гл. – Барнаул» Западно-Сибирской ж/д., пр-т Строителей в г. Новосибирск	2013 г.
9	Мост через р. Карпысак, 114+915 км а/д «130 км а/д «М-53» – Тогучин-Карпысак	2012 г.
10	Мост через ручей на км 0+385 автоподъезда к р.п. Татищево от а/д Тамбов-Ртищево-Саратов	2011 г.
11	Мост через р. Тишковка на 93 км а/д Кукуштан-Чайковский в Осиновском районе Пермского края	2009 г.

Составлена авторами

Таким образом, созданный научно-технический задел и практическая реализация позволяют говорить о целесообразности широкого внедрения созданных технологий в строительной отрасли.

4. Применение ВОСМ строительных сооружений

Отдельно стоит отметить опыт внедрения волоконно-оптических систем мониторинга строительных сооружений компанией ООО «Инверсия-Сенсор».

Для контроля технического состояния металлических конструкциях стадиона «Заря» в г. Новосибирск была реализована система мониторинга (рисунок 8), включающая в себя аппаратно-программный комплекс ASTRO, более 100 ВОД, в том числе 32 ВОД температуры для осуществления термокомпенсации, а также датчики перемещения и тахеометры для мониторинга пролетов рамных конструкций [23].

Рисунок 8. *Стадион «Заря» с установленной ВОСМ (фото авторов)*

Таким образом, система онлайн мониторинга металлических конструкций стадиона осуществляла контроль напряженно-деформированного состояния несущих металлических конструкций, фундамента, а также контроль снеговой нагрузки с учетом реальных условий эксплуатации (рисунок 9).

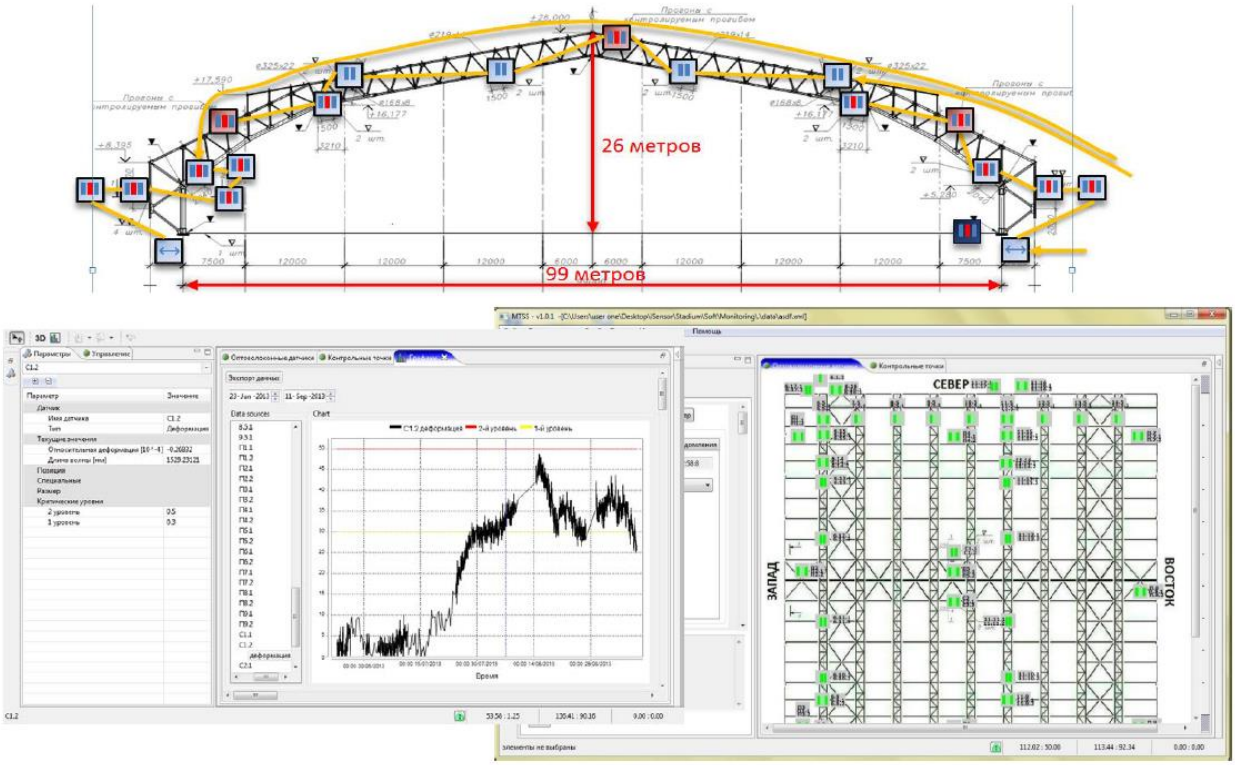

Рисунок 9. *Топология ВОД и скриншоты СПО в процессе мониторинга (составлена авторами)*

Как следует из рисунков 8 и 9 в режиме реального времени осуществляется вывод информации в единый диспетчерский центр, при этом реализована возможность контроля с учетом нескольких уровней пороговых нагрузок, факт превышения каждой из которых выдается диспетчеру с соответствующим оповещением. Дополнительно реализованы SMS- и E-mail-оповещения ответственных лиц, а также возможность удаленного доступа для просмотра данных мониторинга и отчетов за каждый период.

Большую практическую значимость имеет внедрение ВОСМ на сложных гидротехнических сооружениях. Это вызвано необходимостью поэтапной замены

традиционных струнных датчиков, которые широко используются для мониторинга конструкций данного типа, что в свою очередь обусловлено усложнением конструкций объектов мониторинга, а также повышению требований к информативности контроля и диагностики в условиях долговременной эксплуатации.

Специалистами ООО «Инверсия-Сенсор» совместно с ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» (г. Санкт-Петербург) реализован уникальный проект по разработке и внедрению ВОСМ на Зарамагской ГЭС-1, в т. ч. на конструкциях вертикальной шахты, бассейна суточного регулирования и деривационном туннеле (рисунок 10) [24].

а) б) в)

Рисунок 10. *ВОСМ гидротехнических сооружений [24]:*
а) измерение деформации и температуры сварных швов металлической обечайки вертикальной шахты; б) определение угла наклона в вертикальной шахте; в) контроль технического состояния деривационного тоннеля

Полученные результаты мониторинга свидетельствуют об эффективности предложенных технических решений. Вместе с тем еще предстоит оценить долговременную стабильность работы ВОД в реальных условиях эксплуатации, что позволит оптимизировать ВОСМ применительно к реальным конструкциям с учетом влияния климатических и иных факторов.

В период с 2010 г. по настоящее время реализовано более 20 проектов в области реализации ВОСМ под ключ на объектах строительной, транспортной, энергетической и других отраслей промышленности.

5. Применение комплексной системы усиления и мониторинга строительных сооружений

Отдельно стоит упомянуть опыт внедрения комплексной системы усиления и мониторинга несущих конструкций моста 739 серии через реку Любовша, км 118 ПК 7+46 м пути участок Орел-Елец Московской железной дороги, введенного в эксплуатацию в 1869 г.

Мост однопролетный, однопутный. Схема моста 1х45 м. Общая длина моста 81,32 м (рисунок 11).

В плане мост расположен на прямом участке дороги и пересекает реку Любовша под прямым углом. Продольный уклон -7.5 ‰. Река Любовша не судоходная и не сплавная. Расстояние от подошвы рельса до уровня меженных вод – 20,34 м.

По результатам проведенного обследования были выявлены многочисленные повреждения конструкции.

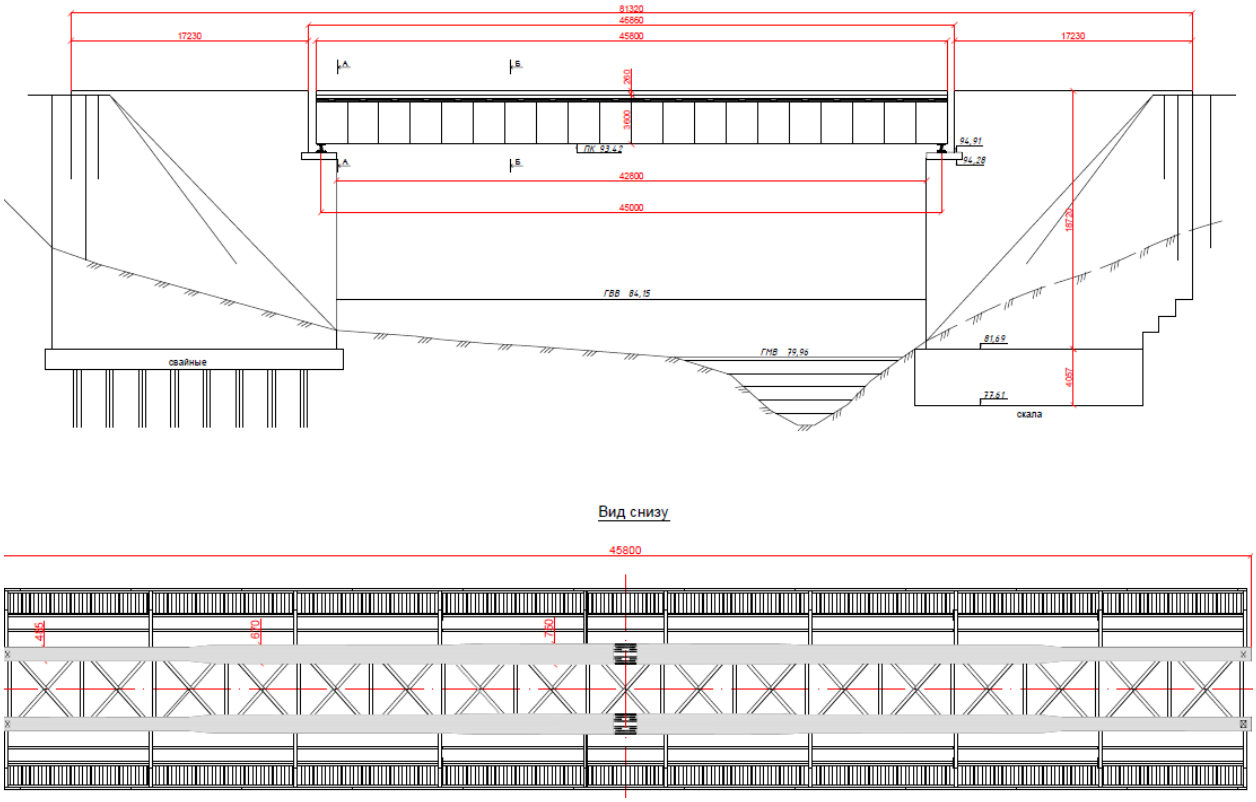

Рисунок 11. *Эскиз моста через р. Любовша (составлено авторами)*

Среди них стоит отметить отверстия в нижнем растянутом поясе главных балок, не заполненные болтами, поперечная трещина в плите балластного корыта в середине пролета, на устое №0 в опорных узлах пролетного строения в верхней части вертикального листа обеих главных балок в двух местах имеются горизонтальные трещины длиной от 100 до 150 мм. Трещины расположены в верхних местах крепления ребер жесткости к вертикальным балкам и по зоне сплавления поясных швов с обеих сторон от ребра жесткости. Нижние трещины по концам засверлены и в отверстия установлены высокопрочные болты, верхние трещины, по шву, отмечены краской. Опоры моста имели многочисленные повреждения: раковины и сколы с оголением арматуры «рубашки», отслоение штукатурки, следы подтеков воды и биологической коррозии, силовые вертикальные трещины по фасаду и боковым поверхностям, расстройство облицовки, выветривание швов. Лестничные сходы по откосам насыпи разрушены. Сквозное разрушение бетона тротуарных плит в местах опирания на консоли.

Таким образом, было установлено, что общее техническое состояние сооружения оценивается как неудовлетворительное. По результатам выполненных расчетов было определено, что грузоподъемность пролетного строения сооружения недостаточна для пропуска нагрузки С14.

Для определения фактического технического состояния моста на нижний пояс пролетного строения была установлена ВОСМ. По результатам контроля и дальнейшей обработки данных было получено фактическое значение прогиба, которое составило 71 мм, что является недопустимым.

Использование СВА, устанавливаемых методом послойного нанесения непосредственно на объект, в данном случае невозможно, ввиду разности коэффициентов линейного температурного расширения (КЛТР) углепластика и металлической балки.

Коллективом специалистов при участии Ассоциации строителей России было предложено в качестве СВА использовать оригинальную запатентованную технологию

шпренгельного усиления [25] с использованием современных ПКМ. Шпренгели изготавливались в виде ламелей на основе на основе биаксиальной углеродной ткани 1270(+45/-45)-300, артикул См-42010, и клеевого эпоксидного связующего MC DUR 1209 TX фирмы BASF SE (рисунок 12).

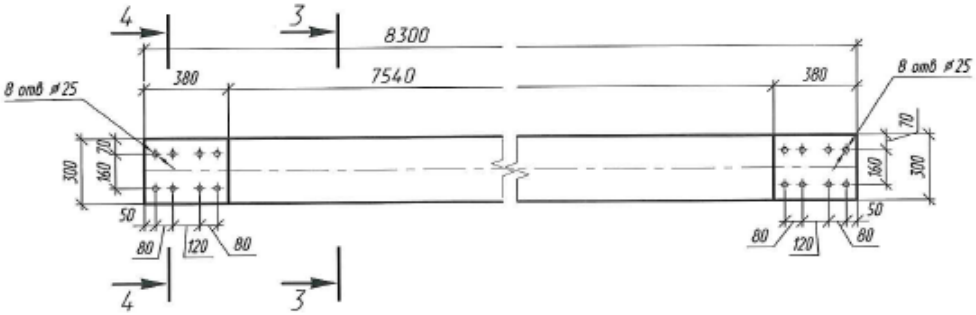

Рисунок 12. *Эскиз ламели из ПКМ для усиления мостовых конструкций (составлен авторами)*

Габариты ламелей и схема армирования выбирались исходя из результатов расчетов с использованием современных расчётных комплексов.

Закрепление шпренгелей осуществлялось методом дискретного механического крепления непосредственно на нижний пояс пролетного строения с использованием высокопрочных болтов (рисунок 13).

Рисунок 13. *Установка композитных шпренгелей на нижний пояс моста (фото авторов)*

ВОСМ включала в себя стоечный 4-х канальный анализатор сигналов ASTRO A321 с подключенными ВОД деформации ASTRO A521 и ВОД температуры ASTRO A511, устанавливаемыми непосредственно на нижний пояс пролетного строения, а также ВОД деформации ASTRO A523 и ВОД температуры ASTRO A513, встраиваемые в штрабы в бетоне вдоль оси опоры и замуровываемые эпоксибетоном. Зоны расположения ВОД показаны на рисунке 14.

Рисунок 14. *Зоны расположения ВОД (фото авторов)*

Дополнительно между каждой из опор моста и балкой моста посредством крепежного металлического кронштейна был установлен ВОД линейных перемещений ASTRO A531. Эскиз расположения ВОД перемещения между опорами и балками моста представлен на рисунке 15.

Рисунок 15. *Установка ВОД линейных перемещений (схема и фото авторов)*

В результате проведения описанных мероприятий по установке СВА и ВОСМ была восстановлена грузоподъемность пролетного строения моста и проведен контроль качества выполненного усиления за счет оценки фактического технического состояния с помощью ВОД. Фактическое значение полученного прогиба значительно уменьшилось и составило 32 мм, что соответствует значениям, необходимым для дальнейшей безопасной эксплуатации. Результаты сравнительного контроля технического состояния пролетного строения моста до и после установки СВА показаны на рисунке 16.

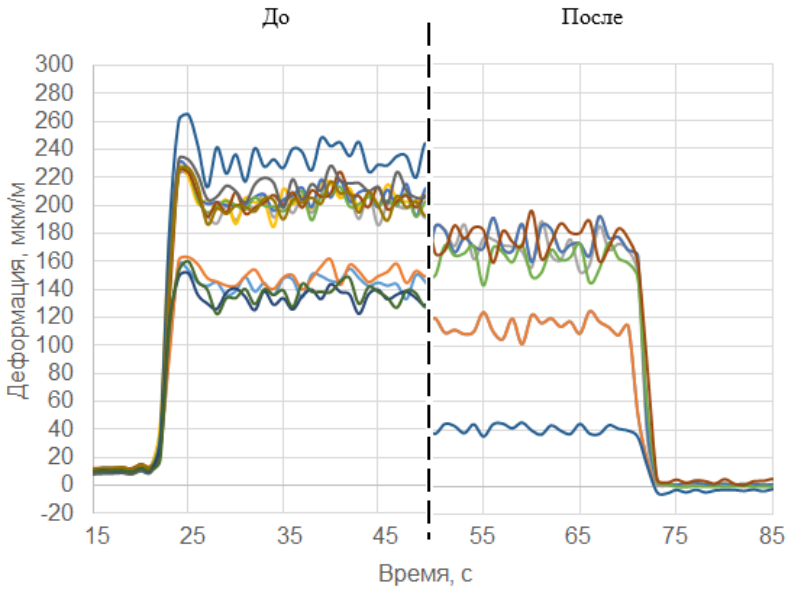

Рисунок 16. *Результаты контроля нижнего пояса пролетного строения до и после установки СВА с помощью ВОСМ [26]*

Полное описание полученных экспериментальных результатов приведено в [26].

Экономия средств при проведении усиления данного моста составила 47 % по сравнению с аналогичной стоимостью при проведении работ по реконструкции классическими методами.

Это свидетельствует об эффективности предложенных технических решений как с технической, так и с экономической точки зрения.

Выводы

Проведен анализ эксплуатируемых конструкций металлических, сталежелезобетонных и железобетонных мостов. Выявлены основные типы дефектов и неисправностей, возникающих в процессе эксплуатации мостов. Кратко проанализированы основные методы и технологии, применяемые для восстановления несущей способности и грузоподъёмности мостовых сооружений. С учетом отечественного и зарубежного опыта установлено, что наиболее перспективным способом усиления мостовых конструкций является применение ПКМ. Проведено обобщение современных методов и средств контроля и диагностики, основным результатом которого является выбор оптимальных с точки зрения эксплуатации строительных сооружений типов датчиков и систем мониторинга на их основе. С точки зрения эффективности и целесообразности применения в настоящее время предложено использовать ВОСМ на основе ВБР.

По результатам проведенных мероприятий по применению СВА на основе ПКМ для усиления конструкций мостов и ВОСМ на основе ВБР для контроля и диагностики их фактического состояния стоит отметить, что широкое применение данных технологий обеспечивает продление срока безопасной эксплуатации, весовую эффективность и технологичность предложенных технических решений, простоту и сравнительно короткие сроки проведения работ, возможность отслеживания критических ситуаций на объектах в едином информационно-аналитическом центре, минимизацию влияния человеческого фактора при проведении регламентных работ по обследованию мостов, усиление несущих металлических балок без ограничения транспортного потока, скоростного режима и дополнительных временных окон, экономическую эффективность не менее 20 % в сравнении с усилением традиционными методами, потенциальное повышение пропускной способности за счет оптимизации скоростного режима.

ЛИТЕРАТУРА

1. РЖД жалуется, что мосты в ее хозяйстве находятся в царском состоянии [Электронный ресурс.]: Электрон. текстовые, граф. дан. в формате *.html URL: https://www.vedomosti.ru/business/articles/2011/07/25/stoletnie_mosty (дата обращения: 27.11.2019 г.).
2. ОДМ 218.3.100-2017 Рекомендации по применению материалов для ремонта бетонных и железобетонных конструкций транспортных сооружений [Электронный ресурс.]: Электрон. текстовые, граф. дан. в формате *.html URL: http://docs.cntd.ru/document/557297116 (дата обращения: 27.11.2019 г.).
3. Иванников В.В., Николаев А.Г., Шварц В.М., Рябов О.Б., Степанов В.Н. Характерные дефекты и повреждения металлических конструкций // Химическая техника – 2015 – № 7. – С. 7.
4. ГОСТ Р 22.1.12-2005. Структурированная система мониторинга и управления инженерными системами здания и сооружений. Общие требования [Электронный ресурс.]: Электрон. текстовые, граф. дан. в формате *.html URL: http://docs.cntd.ru/document/1200039543 (дата обращения: 27.11.2019 г.).
5. Болдырев Г.Г., Валеев Д.Н., Живаев А.А., Нестеров П.В. Системы мониторинга строительных конструкций зданий и сооружений [Электронный ресурс.]:

Электрон. текстовые, граф. дан. в формате *.html URL: http://npp-geotek.com/f/sistemamonitoringakonstruktsiy.pdf (дата обращения: 27.11.2019 г.).

6. Система внешнего армирования из углеродных композитных материалов для ремонта и усиления строительных конструкций [Электронный ресурс.]: Электрон. текстовые, граф. дан. в формате *.html URL: http://www.hccomposite.com/upload/files/stroyka%20technika/SVA%20v%20stroitelstve.pdf (дата обращения: 27.11.2019 г.).
7. Система внешнего армирования FibArm [Электронный ресурс.]: Электрон. текстовые, граф. дан. в формате *.html URL: https://www.csm-spb.ru/assets/pdf/Kompozit%20usilenie/%D0%9F%D1%80%D0%B5%D0%B7%D0%B5%D0%BD%D1%82%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F%20%D0%A1%D0%92%D0%90%202017_correct.pdf (дата обращения: 27.11.2019 г.).
8. Система внешнего армирования Carbonwrap [Электронный ресурс.]: Электрон. текстовые, граф. дан. в формате *.html URL: http://carbonwrap.ru/ (дата обращения: 27.11.2019 г.).
9. Готовые решения для ремонта и строительства промышленных зданий и сооружений [Электронный ресурс.]: Электрон. текстовые, граф. дан. в формате *.html URL: https://assets.master-builders-solutions.basf.com/ru-ru/basf-resheniia-dlia-promishlennich-zdanii-i-soorugenii.pdf (дата обращения: 27.11.2019 г.).
10. Усиление конструкций [Электронный ресурс.]: Электрон. текстовые, граф. дан. в формате *.html URL: https://rus.sika.com/ru/solutions_products/02/remont_betona/mosty/rewenija_dlia_mostov/usilenie_konstrukcij.html (дата обращения: 27.11.2019 г.).
11. Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Чесноков Г.В., Покулаев К.В. Усиление металлических конструкций фиброармированными пластиками: часть 1. состояние проблемы // Науковедение. – 2014. – № 3. – 27 с. – URL: https://naukovedenie.ru/PDF/19TVN314.pdf (дата обращения: 27.11.2019 г.).
12. Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Чесноков Г.В., Покулаев К.В. Усиление металлических конструкций фиброармированными пластиками: Часть 2. Применение метода предельных состояний к расчету растягиваемых и изгибаемых конструкций // Науковедение. – 2014. – № 3 – 23 с. – URL: https://naukovedenie.ru/PDF/20TVN314.pdf (дата обращения: 27.11.2019 г.).
13. Miller T.C., Chajes M.J., Mertz D.R., Hastings J.N. Strengthening of a Steel Bridge Girder using CFRP Plates // Journal of Bridge Engineering. – 2001. – V. 6(6). – P. 514–522.
14. Peiris A., Harik I.E. Field Testing of Steel Bridge Girders Strengthened Using Ultra High Modulus (UHM) Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Laminates // Conference Proceedings: The 6th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering. – 13–15 June 2012. – Rome. – 8 P.
15. Голушко С.К., Харенко Д.С., Чейдо Г.П., Чурин А.Е., Шакиров С.Р., Шелемба И.С. Мониторинг производственной среды угольных шахт волоконно-оптическими датчиками // В сборнике: Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности Сборник трудов XIV международной научно-практической конференции. под редакцией Клишина В.И.; Исмагилова З.Р.; Блюменштейна В.Ю.; Протасова С.И.; Дубинина Г.П. – 2012. – С. 83–85.

16. В.В. Шишкин, А.Е. Чурин, Д.С. Харенко, И.С. Шелемба Система мониторинга несущих конструкций футбольного манежа на основе волоконно-оптических датчиков // Фотон-Экспресс. – 2013. – № 6(110). – С. 22–23.
17. Травуш В.И., Шахраманьян А.М., Колотовичев Ю.А., Шахворостов А.И., Десяткин М.А., Шулятьев О.А., Шулятьев С.О. «Лахта центр»: автоматизированный мониторинг деформаций несущих конструкций и основания // Academia. Архитектура и строительство. – 2018. – № 4. – С. 94–108.
18. Способ мониторинга и прогнозирования технического состояния зданий и сооружений и система мониторинга и прогнозирования технического состояния зданий и сооружений (варианты): пат. № 2381470 Рос. Федерация: G01M 7/00 Шахраманьян А.М., Шахраманьян М.А.; – № 2008106992/28; заявл. 14.09.2017; опубл. 19.12.2018, Бюл. № 35, 10 с.
19. Ye X.-W., Su Y.-H., Xi P.-S. Statistical Analysis of Stress Signals from Bridge Monitoring by FBG System // Sensors (Basel). – 2018. – V. 18(2): 491. – 14 P. – URL: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5855928/ (дата обращения: 27.11.2019 г.).
20. Wang C.-Y., Wang H.-L., Chen M.-H. Applications of FBG Sensors on Bridge Health Monitoring & Diagnosis // Taiwan-Japan Symposium on Advancement of Urban Earthquake Hazard Mitigation Technology (Jhongli, Taoyuan, Taiwan). – 2005. – 9 P. – URL: https://www.researchgate.net/publication/229035582_Applications_of_FBG_Sensors_on_Bridge_Health_Monitoring_Diagnosis (дата обращения: 27.11.2019 г.).
21. Kiong S.C., Madhav A.V.G., Suresh B. Application of Structural Health Monitoring Technology in Asia. – IWSHM 2015. – Nanyang Technological University. – 42 P. – URL: https://web.stanford.edu/group/sacl/workshop/documents/Keynote%20presentations/IWSHM%202015/IWSHM_Keynote_Soh_published.pdf (дата обращения: 27.11.2019 г.).
22. Овчинников И.Г., Валиев Ш.Н., Овчинников И.И., Зиновьев В.С., Умиров А.Д. Вопросы усиления железобетонных конструкций композитами: 2. Натурные исследования усиления железобетонных конструкций композитами, возникающие проблемы и пути их решения // Науковедение. – 2012. – № 4. – 37 с. – URL: https://naukovedenie.ru/PDF/8tvn412.pdf (дата обращения: 27.11.2019 г.).
23. Шишкин В.В., Гранёв И.В., Шелемба И.С. Отечественный опыт производства и применения волоконно-оптических датчиков // Прикладная фотоника. – 2016. – Т. 3. – № 1. – С. 61–75.
24. Кузнецов А.С., Дубок В.В., Макушин А.Л., Сергеев И.В., Шелемба И.С., Гранёв И.В. Применение точечных волоконно-оптических датчиков на гидротехнических сооружениях строящейся Зарамагской ГЭС-1 // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева. – 2014. – Т. 273. – С. 36–44.
25. Устройство повышения несущей способности металлических конструкций инженерных сооружений: Решение о выдаче патента от 04.10.2019 г. Рос. Федерация: E01D 22/00, E04G 23/00, E04G 23/02 Лоскутов М.Л.; – № 2018122657; заявл. 21.06.2018 г.
26. Федотов М.Ю., Лоскутов М.Л., Шелемба И.С., Колесников А.В., Овчинников И.Г. К вопросу мониторинга несущих металлических конструкций мостов с использованием волоконно-оптических датчиков // Транспортные сооружения. – 2018. – Т. 5. – № 3. – С. 10.

Fedotov Mikhail Yurievich
Russian builders association, Moscow, Russia
Russian engineering academy, Moscow, Russia
E-mail: fedotovmyu@gmail.com

Koshman Nikolay Pavlovich
Russian builders association, Moscow, Russia
Russian engineering academy, Moscow, Russia
E-mail: info@a-s-r.ru

Gusev Boris Vladimirovich
Russian engineering academy, Moscow, Russia
E-mail: info-rae@mail.ru

Speransky Anatoly Alexeevich
Russian engineering academy, Moscow, Russia
E-mail: vibro-vector@yandex.ru

Loskutov Maxim Leonidovich
Association of expert organizations in construction, Moscow, Russia
Russian engineering academy, Moscow, Russia
E-mail: m.lloskutoff@gmail.com

Ovchinnikov Igor Georgievich
Industrial university of Tyumen, Tyumen, Russia
Perm national research polytechnic university, Perm, Russia
Yuri Gagarin state technical university of Saratov, Saratov, Russia
E-mail: bridgesar@mail.ru

Bokarev Sergey Aleksandrovich
Siberian transport university, Novosibirsk, Russia
E-mail: bokarevsa@211.ru

Shelemba Ivan Sergeevich
Inversiya-Sensor LLC, Perm, Russia
E-mail: shelemba@i-sensor.ru

Budadin Oleg Nikolaevich
Central research institute for special machinery JSC, Khotkovo, Russia
Russian engineering academy, Moscow, Russia
E-mail: Oleg.budadin@yandex.ru

Kozel'skaya Sofiya Olegovna
Central research institute for special machinery JSC, Khotkovo, Russia
E-mail: kozelskaya.sofik.1977@yandex.ru

Application experience of composite external reinforcement systems and optical monitoring of building structures

Abstract. This article describes results of the widespread use of external reinforcement systems for reinforced concrete and metal man-made structures based on domestic and foreign polymer composite materials (PCM), as well as fiber-optic monitoring systems, including a network of fiber-

optic sensors (FOS) and a hardware-software complex that track the actual state of the control object throughout the entire life cycle. It is shown that for reinforced concrete structures it is advisable to use composite systems of external reinforcement installed directly on the reinforcement object by contact molding using special cold curing binders. In relation to metal structures, this technology is unacceptable due to a significant difference in the coefficients of linear thermal expansion of the metal and the carbon composite. To solve this problem, reinforcement technology has been proposed, which consists in installing discrete mechanical fasteners of finished composite spigots (similar to metal ones) made by autoclave and autoclave-free molding methods. In the event that deviations from the normative indicators for this type of structures are detected, the necessary set of measures is taken to strengthen, after which the monitoring system carries out a similar control, the results of which characterize the quality of the work performed. Thus, the monitoring system can act both as an effective tool for structural control and carry out local time monitoring before or after the relevant works on strengthening and reconstruction, and in real time work throughout the entire period of operation.

Keywords: polymer composite material; composite external reinforcement system; strengthening; monitoring; fiber optic sensor; reinforced concrete structure; metal structure

REFERENCES

1. Vedomosti. (n.d.). *Russian Railways complains that bridges in its economy are in royal condition*. [online] Available at: https://www.vedomosti.ru/business/articles/2011/07/25/stoletnie_mosty (in Russian) [Accessed 27.11.2019].
2. Docs.cntd. (n.d.). *ODM 218.3.100-2017 Recommendations on the use of materials for the repair of concrete and reinforced concrete structures of transport structures*. [online] Available at: http://docs.cntd.ru/document/557297116 (in Russian) [Accessed 27.11.2019].
3. Ivannikov V.V., Nikolaev A.G., Shvarts V.M., Ryabov O.B., Stepanov V.N. (2015). Typical defects and damage to metal structures. *Chemical Engineering*, 7, p. 7 (in Russian).
4. Docs.cntd. (n.d.). *GOST R 22.1.12-2005. Structured monitoring and control system for engineering systems of buildings and structures. General requirements*. [online] Available at: http://docs.cntd.ru/document/1200039543 (in Russian) [Accessed 27.11.2019].
5. npp-geotek. (n.d.). *Boldyrev G.G., Valeev D.N., Zhivaev A.A., Nesterov P.V. Monitoring systems for building structures of buildings and structures*. [online] Available at: http://npp-geotek.com/f/sistemamonitoringakonstruktsiy.pdf (in Russian) [Accessed 27.11.2019].
6. hccomposite. (n.d.). *External reinforcement system made of carbon composite materials for repair and reinforcement of building structures*. [online] Available at: http://www.hccomposite.com/upload/files/stroyka%20technika/SVA%20v%20stroitelstve.pdf (in Russian) [Accessed 27.11.2019].
7. csm-spb. (n.d.). *FibArm External Reinforcement System*. [online] Available at: https://www.csm-spb.ru/assets/pdf/Kompozit%20usilenie/%D0%9F%D1%80%D0%B5%D0%B7%D0%B5%D0%BD%D1%82%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F%20%D0%A1%D0%92%D0%90%202017_correct.pdf (in Russian) [Accessed 27.11.2019].

8. carbonwrap. (n.d.). *Carbonwrap External Reinforcement System*. [online] Available at: http://carbonwrap.ru/ (in Russian) [Accessed 27.11.2019].

9. assets.master-builders-solutions.basf. (n.d.). *Ready-made solutions for the repair and construction of industrial buildings and structures*. [online] Available at: https://assets.master-builders-solutions.basf.com/ru-ru/basf-resheniia-dlia-promishlennich-zdanii-i-soorugenii.pdf (in Russian) [Accessed 27.11.2019].

10. rus.sika. (n.d.). *Strengthening Structures*. [online] Available at: https://rus.sika.com/ru/solutions_products/02/remont_betona/mosty/rewenija_dlia_mostov/usilenie_konstrukcij.html (in Russian) [Accessed 27.11.2019].

11. Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Chesnokov G.V., Pokulaev K.V. (2014). Strengthening of metal structures with fiber reinforced plastic: Part 1. State of the problem. *Naukovedenie*, [online] 3(6), p. 27. Available at: https://naukovedenie.ru/PDF/19TVN314.pdf (in Russian) [Accessed 27.11.2019].

12. Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Chesnokov G.V., Pokulaev K.V. (2014). Reinforcement of metal structures with fiber reinforced plastics: Part 2. Application of the limit state method to the calculation of tensile and flexible structures. *Naukovedenie*, [online] 3(6), p. 23. Available at: https://naukovedenie.ru/PDF/20TVN314.pdf (in Russian) [Accessed 27.11.2019].

13. Miller T.C., Chajes M.J., Mertz D.R., Hastings J.N. (2001). Strengthening of a Steel Bridge Girder using CFRP Plates. *Journal of Bridge Engineering*, 6(6), pp. 514–522.

14. Peiris A., Harik I.E. (2012). *Field Testing of Steel Bridge Girders Strengthened Using Ultra High Modulus (UHM) Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Laminates*. Rome. p. 8.

15. Golushko S.K., Kharenko D.S., Cheydo G.P., Churin A.E., Shakirov S.R., Shelemba I.S. (2012). Monitoring proizvodstvennoy sredy ugol′nykh shakht volokonno-opticheskimi datchikami. [*Monitoring the production environment of coal mines with fiber optic sensors*.] pp. 83–85.

16. Shishkin V.V., Churin A.E., Kharenko D.S., Shelemba I.S. (2013). Monitoring system of the supporting structures of a football arena based on fiber-optic sensors. *Photon Express*, 6(110), pp. 22–23 (in Russian).

17. Travush V.I., Shakhraman′yan A.M., Kolotovichev Yu.A., Shakhvorostov A.I., Desyatkin M.A., Shulyat′ev O.A., Shulyat′ev S.O. (2018). «Lakhta Center»: automated monitoring of deformations of load-bearing structures and foundations. *Academia. Architecture and construction*, 4, pp. 94–108 (in Russian).

18. Golushko S.K., Kharenko D.S., Cheydo G.P., Churin A.E., Shakirov S.R., Shelemba I.S. (2012). Sposob monitoringa i prognozirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya zdaniy i sooruzheniy i sistema monitoringa i prognozirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya zdaniy i sooruzheniy (varianty): pat. № 2381470 Ros. Federatsiya: G01M 7/00 Shakhraman′yan A.M., Shakhraman′yan M.A.; – № 2008106992/28; zayavl. 14.09.2017; opubl. 19.12.2018, Byul. № 35. [*A method for monitoring and forecasting the technical condition of buildings and structures and a system for monitoring and forecasting the technical condition of buildings and structures (options): US Pat. No. 2381470 Ros. Federation: G01M 7/00 Shahramanyan A.M., Shahramanyan M.A.; – No. 2008106992/28; declared 09/14/2017; publ. 12/19/2018, Bull. Number 35*.] p. 10.

19. Ye X.-W., Su Y.-H., Xi P.-S. (2018). Statistical Analysis of Stress Signals from Bridge Monitoring by FBG System. *Sensors (Basel)*, [online] 18(2): 491, p. 14. Available at: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5855928/ [Accessed 27.11.2019].

20. Wang C.-Y., Wang H.-L., Chen M.-H. (2005). Applications of FBG Sensors on Bridge Health Monitoring & Diagnosis. *Taiwan-Japan Symposium on Advancement of Urban Earthquake Hazard Mitigation Technology (Jhongli, Taoyuan, Taiwan)*, [online] p. 9. Available at: https://www.researchgate.net/publication/229035582_Applications_of_FBG_Sensors_on_Bridge_Health_Monitoring_Diagnosis [Accessed 27.11.2019].

21. Kiong S.C., Madhav A.V.G., Suresh B. (2015). Application of Structural Health Monitoring Technology in Asia. – IWSHM 2015. *Nanyang Technological University*, [online] p. 42. Available at: https://web.stanford.edu/group/sacl/workshop/documents/Keynote%20presentations/IWSHM%202015/IWSHM_Keynote_Soh_published.pdf [Accessed 27.11.2019].

22. Ovchinnikov I.G., Valiev Sh.N., Ovchinnikov I.I., Zinov′ev V.S., Umirov A.D. (2012). Issues of reinforcement of reinforced concrete structures with composites: 2. Field studies of reinforcement of reinforced concrete structures with composites, emerging problems and solutions. *Naukovedenie*, [online] 4(4), p. 37. Available at: https://naukovedenie.ru/PDF/8tvn412.pdf (in Russian) [Accessed 27.11.2019].

23. Shishkin V.V., Granyov I.V., Shelemba I.S. (2016). Domestic experience in the production and use of fiber-optic sensors. *Applied Photonics*, 1(3), pp. 61–75 (in Russian).

24. Kuznetsov A.S., Dubok V.V., Makushin A.L., Sergeev I.V., Shelemba I.S., Granyov I.V. (2014). The use of point fiber-optic sensors in hydraulic structures of the Zaramagskaya HPP-1 under construction. *News of the All-Russian Scientific Research Institute of Hydrotechnics named after B.E. Vedeneeva*, (273), pp. 36–44 (in Russian).

25. Loskutov M.L. (2018). Ustroystvo povysheniya nesushchey sposobnosti metallicheskikh konstruktsiy inzhenernykh sooruzheniy: Reshenie o vydache patenta ot 04.10.2019 g. Ros. Federatsiya: E01D 22/00, E04G 23/00, E04G 23/02 Loskutov M.L.; – № 2018122657; zayavl. 21.06.2018 g. [*Device for increasing the bearing capacity of metal structures of engineering structures: Decision on the grant of a patent dated 10/04/2019 Ros. Federation: E01D 22/00, E04G 23/00, E04G 23/02 Loskutov M.L.; – No. 2018122657; declared 06/21/2018*].

26. Fedotov M.Yu., Loskutov M.L., Shelemba I.S., Kolesnikov A.V., Ovchinnikov I.G. (2018). To the issue of monitoring of metal-bearing bridges supporting fiber optic sensors. *Russian journal of transport engineering*, [online] 3(5), p. 10. Available at: https://t-s.today/PDF/11SATS318.pdf (in Russian). DOI: 10.15862/11SATS318.