

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 69.059.3:620.179.18

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.1.105-114

Применение комплексной системы оптического мониторинга технического состояния с внешним композитным армированием строительных конструкций

Михаил Юрьевич Федотов¹, Александр Анатольевич Кальгин¹,
Евгений Евгеньевич Шмойлов², Павел Дмитриевич Капырин³,
Олег Александрович Корнев³

¹ Российская инженерная академия (РИА); г. Москва, Россия;

² АО «Препрег-Современные Композиционные Материалы» (АО «Препрег-СКМ»); Москва, Россия;

³ Национальный исследовательский Московский государственный строительный
университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Обоснована актуальность применения современных методов непрерывной оценки фактического состояния автомобильных и железнодорожных мостов, промышленных и иных инженерных сооружений. Приведены результаты широкого использования оптического метода непрерывного контроля технического состояния инженерных сооружений в реальных условиях эксплуатации.

Материалы и методы. Использованы квазираспределенные волоконно-оптические датчики (ВОД) на основе волоконных брэгговских решеток. Представлен опыт применения волоконно-оптических систем мониторинга, в общем случае включающих: совокупность ВОД, построенных на различных физических принципах; многоканальные устройства их опроса (интеррогаторы); встроенное специальное программное обеспечение, предназначенное для сбора, обработки и визуализации данных мониторинга. Среди наиболее известных разработчиков и поставщиков композитных систем внешнего армирования на основе углеродных армирующих волокон стоит выделить зарубежные и отечественные материалы торговых марок MasterBrace (фирма BASF SE, Германия), SikaWrap (фирма Sika Group, Германия), Torayca (фирма Toray Industries, Япония), FibArm (АО «Препрег-СКМ», Россия), S&P (АО «Триада-Холдинг», Россия) и др. Одними из первых нормативных документов, устанавливающих требования к организации мониторинга в строительной отрасли, являются МГСН 4.19–2005, ГОСТ Р 22.1.12–2005, МРДС-02–08 и др.

Результаты. Установлено, что одной из наиболее перспективных технологий восстановления поврежденных конструкций служит применение систем внешнего армирования из полимерных композитных материалов на основе углеродных волокон и полимерных связующих холодного отверждения. Описан опыт практического использования композитных систем внешнего армирования инженерных сооружений.

Выводы. Результаты контроля позволяют своевременно выявлять снижение несущей способности, возникновение эксплуатационных повреждений, планировать ремонтные мероприятия. Применение волоконно-оптических методов и средств непрерывной диагностики и композитных систем внешнего армирования в комплексе дают возможность обеспечить безопасность эксплуатации инженерных сооружений в реальных условиях.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: инженерное сооружение, промышленное здание, мост, волоконно-оптическая система мониторинга, волоконно-оптический датчик, полимерный композитный материал, композитная система внешнего армирования, усиление

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Федотов М.Ю., Кальгин А.А., Шмойлов Е.Е., Капырин П.Д., Корнев О.А. Применение комплексной системы оптического мониторинга технического состояния с внешним композитным армированием строительных конструкций // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 1. С. 105–114. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.1.105-114

Автор, ответственный за переписку: Олег Александрович Корнев, morozovaanna499@gmail.com, i@okornev.ru.

Application of a complex system for optical monitoring of technical condition of building structures with external composite reinforcement

Mikhail Yu. Fedotov¹, Alexander A. Kalgin¹, Evgeniy E. Shmoilov²,
Pavel D. Kapyrin³, Oleg A. Kornev³

¹ Russian Academy of Engineering (RAE); Moscow, Russian Federation;

² Joint-stock company "Prepreg – Advanced Composite Materials"; Moscow, Russian Federation;

³ Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The relevance of using modern methods for continuous assessment of the actual condition of road and railway bridges, industrial and other engineering structures is substantiated. The results of wide application of optical method for continuous control of technical condition of engineering structures under real operating conditions are presented.

Materials and methods. Using quasi-distributed fibre-optic sensors based on fibre Bragg gratings. This paper presents experience in the application of fibre-optic monitoring systems, which generally include — a set of fibre-optic sensors (FOS), built on different physical principles, — multi-channel devices for their interrogation (interrogators), — built-in special software (Open source software) designed for collecting, processing and visualizing monitoring data. Among the most well-known developers and suppliers of composite systems for external reinforcement based on carbon reinforcing fibres, it is worth mentioning foreign and domestic materials under the trademarks of MasterBrace (BASF SE, Germany), SikaWrap (Sika Group, Germany), Torayca (Toray Industries, Japan), FibARM (JSC "Prepreg-SCM", Russia), S&P (JSC "Triada-Holding", Russia) and others. Some of the first regulatory documents establishing requirements for organizing monitoring in the construction industry are MGSN 4.19–2005, GOST R 22.1.12–2005, MRDS-02–08 and some others.

Results. It was established that one of the most promising technologies for restoration of damaged structures is the application of external reinforcement systems made of polymer composite materials based on carbon fibres and cold-curing polymer binders. The experience of practical application of composite systems of external reinforcement of engineering structures is described.

Conclusions. It is shown that the results of such control allow timely revealing the reduction of bearing capacity, occurrence of operational damages, planning repair measures that the application of fibre-optic methods and means of continuous diagnostics and composite systems of external reinforcement in a complex, allows to provide safety of operation of engineering constructions in real conditions.

KEYWORDS: engineering structure, industrial building, bridge, fibre-optic monitoring system, fibre-optic sensor, polymer composite material, composite external reinforcement system, reinforcement

FOR CITATION: Fedotov M.Yu., Kalgin A.A., Shmoilov E.E., Kapyrin P.D., Kornev O.A. Application of a complex system for optical monitoring of technical condition of building structures with external composite reinforcement. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(1):105-114. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.1.105-114 (rus.).

Corresponding author: Oleg A. Kornev, morozovaanna499@gmail.com, i@okornev.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие науки и техники, применение новых строительных конструкционных материалов, технологий их переработки и утилизации [1], а также автоматизация технологических процессов [2] открывают широкие возможности для внедрения инновационной и наукоемкой продукции [3, 4] в строительной и смежных отраслях промышленности. Главными критериями как при создании новых конструкций, так и при эксплуатации существующих являются долговечность и обеспечение безопасности [5].

Сегодня эксплуатируется огромное количество инженерных сооружений, в частности мостов, спроектированных и возведенных в разное время в соответствии с нормативной документацией того времени. При этом длительная эксплуатация при современном уровне нагрузок приводит к снижению несущей способности и грузоподъемности и в конечном счете влияет на безопасность эксплуатации.

Из открытых источников известно, что степень износа мостов варьируется в довольно широких пределах, как правило от 30 до 70 % (рис. 1).

Основными причинами снижения несущей способности служат растрескивание бетона в местах опирания несущих балок, возникновение и развитие трещин вдоль металлической арматуры вследствие долговременных циклических и ударных воздействий при эксплуатации, морозное разрушение бетонных элементов и коррозия арматуры, а также снижение механических свойств металлических балок из-за усталости металла [6, 7].

Поэтому актуально усиление железобетонных и металлических конструкций системами внешнего армирования с использованием новых полимерных композитных материалов (ПКМ) в комплексе со средствами непрерывной диагностики в режиме реального времени с целью обеспечения безопасной эксплуатации [8, 9].



Рис. 1. Конструкции мостов с высокой степенью износа

Fig. 1. Bridge structures with a high degree of wear and tear

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Вопросам внедрения систем мониторинга — непрерывного неразрушающего контроля (НК) фактического технического состояния инженерных сооружений в настоящее время уделяется недостаточно внимания. Это связано с тем, что внедрение новых технологий и методов НК и технической диагностики представляет собой сложный и длительный процесс, сопряженный с определенными рисками, связанными со сложностью обработки разнородных данных, принятия решений на их основе, необходимостью адаптации к реальным условиям эксплуатации конкретных объектов, например к условиям Крайнего Севера, и т.п. Вместе с тем за последние 15 лет создан научно-технический задел, разработано и производится оборудование для мониторинга, реализовано большое количество проектов, поэтому актуальность широкого внедрения созданных технических решений не вызывает сомнений.

В данной работе приведен опыт применения волоконно-оптических систем мониторинга, в общем случае включающих:

- совокупность волоконно-оптических датчиков (ВОД), построенных на различных физических принципах;
- многоканальные устройства их опроса (интерrogаторы);
- встроенное специальное программное обеспечение (СПО), предназначенное для сбора, обработки и визуализации данных мониторинга.

Наибольшее распространение получили квазираспределенные ВОД на основе волоконных брэгговских решеток (ВБР), представляющие собой массив ВБР, сформированных на одном или нескольких волоконных световодах. Это позволяет реализовать на практике необходимую пространственную топологию под конкретный объект мониторинга с учетом условий его эксплуатации (статических и динамических механических нагрузок, температурных полей и т.п.).

При этом на практике для контроля инженерных сооружений, в частности мостовых конструкций, применяются визуальные методы НК, например, силами специалистов обходчиков, средства классической тензометрии с использованием электрических тензодатчиков. В случае выявления каких-либо повреждений применяются традиционные методы и средства НК — акустические, прежде всего ультразвуковые, тепловые и иные. В качестве ключевых преимуществ таких методов НК выделяют относительную простоту использования, наличие нормативно-технической и правовой базы. Основной недостаток НК заключается в невозможности его осуществления в режиме реального времени, поэтому проводят периодический НК, в том числе для объектов, эксплуатирующихся вдали от населенных пунктов. Неразрушающий контроль, проводимый специалистами — обходчиками, дает лишь субъективную оценку состояния конструкции, что напрямую влияет на безопасность эксплуатации. На основании выявленных НК повреждений принимается решение о мерах для дальнейшей безопасной эксплуатации.

Одним из наиболее перспективных методов усиления несущих конструкций инженерных сооружений, в частности мостов, и дальнейшего мониторинга их состояния является применение ПКМ на основе углеродных армирующих волокон в комплексе со средствами непрерывной диагностики. Применение подобных систем внешнего армирования (СВА) по аналогии с металлическими усиливающими элементами обеспечивает усиление конструкций и непрерывный мониторинг их состояния с выводом информации в автоматизированную систему управления (АСУ), позволяет снизить трудоемкость усиления несущих элементов. Кроме этого, отмечается выигрыш по весовой эффективности, так как по сравнению с собственным весом пролетного строения вклад композитных армирующих элементов минимален.

Применение ПКМ на основе углеродных армирующих волокон обладает преимуществом в сравнении с традиционными металлическими материалами, поскольку они обладают высокой удельной прочностью и эксплуатационными характеристиками, позволяющими применять их в различных климатических зонах. Вместе с тем в ряде случаев с целью уменьшения стоимости армирующего наполнителя могут применяться ПКМ на основе стеклянных армирующих волокон, а также гибридные ПКМ.

Среди наиболее известных разработчиков и поставщиков композитных СВА на основе углеродных армирующих волокон стоит выделить зарубежные и отечественные материалы торговых марок MasterBrace (фирма BASF SE, Германия), SikaWrap (фирма Sika Group, Германия), Тогауса (фирма Toray Industries, Япония), FibArm (АО «Препрег-СКМ», Россия), S&P (АО «Триада-Холдинг», Россия) и др. Экономический эффект от применения композитных СВА варьируется в диапазоне от 15 до 65 %.

Важным аспектом для широкого внедрения волоконно-оптических систем мониторинга совместно с композитными СВА служит создание нормативной базы, регулирующей применение конкретных технических и технологических решений.

Одними из первых нормативных документов, устанавливающих требования к организации мониторинга в строительной отрасли, стали МГСН 4.19–2005¹, ГОСТ Р 22.1.12–2005², МРДС 02–08³ и некоторые другие. Стоит отметить, что эти документы довольно общие и в основном носят рекомендательный характер.

В настоящее время применяется большое количество нормативных документов, являющихся стандартами конкретных организаций. Что касается использования композитных СВА для усиления железнодорожных мостов, эксплуатируемых ОАО «РЖД», в 2013 г. при активном участии АО «Препрег-СКМ» было разработано и утверждено вице-президентом ОАО «РЖД» А.В. Целько «Руководство по усилению железобетонных пролетных строений железнодорожных мостов системой внешнего армирования на основе углеродных волокон». Однако внедрение на реальных объектах представляется сложным в связи с положениями п. 5.4 СП 35.13330.2011 «Мосты и трубы», где использование ПКМ для усиления несущих конструкций железнодорожных мостов недопустимо или в другой трактовке не регламентируется положениями данного документа.

Резюмируя вышесказанное, следует подчеркнуть, что разработка системы технического регулирования внедрения волоконно-оптических систем мониторинга в комплексе с композитными СВА — отдельная актуальная задача, без решения которой использование данных технических решений затруднено.

Опыт применения волоконно-оптических систем мониторинга инженерных сооружений

Изложен опыт практического применения волоконно-оптических систем мониторинга с использованием квазираспределенных ВОД деформации и температуры на основе ВБР, разработанных и серийно производимых компанией ООО «Инверсия-Сенсор» (г. Пермь). Перечень некоторых реализованных проектов в области мониторинга приведен в табл. 1.

¹ МГСН 4.19–2005. Временные нормы и правила проектирования многофункциональных высотных зданий и зданий-комплексов в городе Москве.

² ГОСТ Р 22.1.12–2005. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Структурированная система мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений. Общие требования (с Изменением № 1).

³ МРДС 02–08. Пособие по научно-техническому сопровождению и мониторингу строящихся зданий и сооружений, в том числе большепролетных, высотных и уникальных.

Так, в 2017 г. был реализован проект по оснащению волоконно-оптической системой мониторинга Затонского моста, расположенного в г. Уфе (рис. 2).

В рамках выполнения проекта были разработаны собственная SKADA-система, топология ВОД деформации и температуры и реализован контроль напряженно-деформированного состояния (НДС) металлических конструкций с учетом термокомпенсации, а также контроль частот колебаний моста. Дополнительно было проведено оповещение и вывод информации на пульт диспетчера.

Всего на объекте размещено 22 ВОД, из них 2 датчика линейных перемещений, 2 угла наклона, 8 деформации, 10 температуры. Дополнительно осуществлена интеграция системы с метеокomплексом.

В 2018 г. проведены работы по оснащению системой волоконно-оптического мониторинга стадиона «Пермь Великая» (рис. 3).

С учетом особенностей конструкции стадиона разработана схема расположения ВОД и осуществлен монтаж и коммутация датчиков для непрерывного мониторинга. Дополнительно разработана собственная оболочка Astro SCADA. Для указанных целей было использовано 22 ВОД, из них 10 датчиков линейных перемещений, 8 угла наклона, 2 деформации, 2 температуры. В результате реализованного проекта созданная система обеспечивает контроль НДС несущих металлических конструкций и фундаментов, контроль снеговой нагрузки, а также оповещение и вывод информации на пульт диспетчера.

Разработанное ПО предоставило возможность визуализации текущего уровня сигналов ВОД, опроса датчиков по расписанию, сохранения истории изменений значений датчиков, просмотр истории изменений значений датчиков, визуализацию тревог, квитирование тревог, извещения о тревогах.

В 2021–2022 гг. выполнен проект по разработке и установке волоконно-оптической системы мониторинга свайного фундамента (30 свай) промышленного здания, эксплуатируемого в Норильском промышленном районе. Особенность данного проекта заключается в том, что система должна эксплуатироваться в сложных условиях Крайнего Севера. По результатам теоретических и экспериментальных исследований была разработана и апробирована конструкция измерительного устройства [18] на металлической подложке в форме шестигранника из прутка, калиброванного по ГОСТ 10702 из стали 30ХГСА с установленными серийными ВОД деформации ASTRO A521 и термокомпенсатором на основе ВОД температуры ASTRO A512. С учетом особенностей конструкции свайного фундамента объекта мониторинга разработаны пространственная топология измерительных устройств и схема их коммутации, проведена установка измерительных устройств в количестве 30 шт. на 19 свай. Из-

Табл. 1. Объекты внедрения волоконно-оптических систем мониторинга [10–17]

Table 1. Objects for implementation of fibre-optic monitoring systems [10–17]

Наименование объекта мониторинга Name of monitoring object	Географическое расположение Geographical location
Свайный фундамент промышленного здания Pile foundation of an industrial building	Норильский промышленный район, Россия Norilsk industrial region, Russia
Восстановительно-окислительная установка Reduction-oxidation plant	г. Атырау, Казахстан Atyrau, Kazakhstan
Футбольный манеж «Пермь Великая» Football arena “Perm the Great”	г. Пермь, Россия Perm, Russia
Железнодорожный мост Railway bridge	Мост через р. Любовша, 118 км ПК7+46 линии Орел – Елец Московской железной дороги, главный путь Bridge over the river Lyubovsha, 118 km PK7+46 line Orel – Yelets of the Moscow Railway, main route
Затонский мост Zatonsky bridge	г. Уфа, Россия Ufa, Russia
Надземный переход Overpass	г. Пермь, Россия Perm, Russia
Жилой дом Residential building	ул. Беляева, д. 43, г. Пермь, Россия 43, st. Belyaeva, Perm, Russia
Магистральный газопровод Main gas pipeline	Газопровод Южный поток, Пермский край, Россия South Stream gas pipeline, Perm region, Russia
Оползневый участок магистрального газопровода Landslide section of the main gas pipeline	Газопровод Майкоп – Самурская – Сочи, Россия Maykop – Samurskaya – Sochi gas pipeline, Russia
Магистральный газопровод Main gas pipeline	Газопровод Чусовой – Березники – Соликамск, Пермский край, Россия Chusovoy – Berezniki – Solikamsk gas pipeline, Perm region, Russia
Гидротехнические сооружения Зарамагской ГЭС-1 Hydraulic structures of Zaramagskaya HPP-1	Республика Северная Осетия, Россия Republic of North Ossetia, Russia
Компрессорная станция Добрянская Compressor station Dobryanskaya	Пермский край, Россия Perm region, Russia
Манеж «Заря» Manezh “Zarya”	г. Новосибирск, Россия Novosibirsk, Russia

мерительные устройства закреплялись на сваях с помощью анкеров. Внешний вид измерительных устройств до установки показан на рис. 4, *a*, после установки на сваи — на рис. 4, *b* [19, 20].

Для опроса ВОД было выбрано 8-канальное устройство опроса ASTRO A313. Волоконно-опти-



Рис. 2. Оснащение Затонского моста системой мониторинга

Fig. 2. Equipping the Zatonsky Bridge with a monitoring system

ческая система мониторинга деформации и температуры введена в эксплуатацию в 2022 г. и продолжает эксплуатироваться в настоящее время.

Анализ реализации ряда проектов показал, что создание и внедрение новых образцов оборудования для мониторинга, конструкций датчиков, алгоритмов обработки и визуализации данных, реализованных в ПО, позволяет достичь повышения качества и достоверности контроля сложных технических систем различного назначения.

Опыт применения композитных СВА для усиления инженерных сооружений

Приведен опыт практического использования композитных СВА для усиления инженерных сооружений, разработанных и серийно производимых компанией АО «Препрег-СКМ» (г. Москва), в том числе в комплексе с системами непрерывного мониторинга. Перечень некоторых реализованных проектов в области применения композитных СВА приведен в табл. 2.



Рис. 3. Оснащение стадиона «Пермь Великая» системой мониторинга

Fig. 3. Equipping the “Perm the Great” stadium with a monitoring system

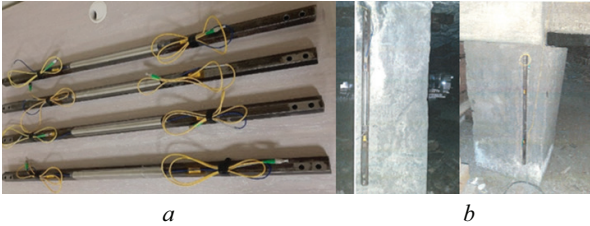


Рис. 4. Конструкция измерительного устройства: *a* — внешний вид; *b* — на свае

Fig. 4. Design of the measuring device: *a* — external view; *b* — on a pile

Один из наиболее интересных реализованных проектов — усиление несущих конструкций Международного центра бокса и самбо Лужники. Так, при разработке проекта по строительству здания изменилась технологическая часть проекта и произошло увеличение нагрузок на плиту перекрытия. С учетом этого обстоятельства потребовалось усиление несущих конструкций композитными СВА. Внешний вид конструкций до и после усиления представлен на рис. 5.

Выполнены работы по усилению несущих конструкций буддийского храма в г. Кызыл. По результатам проведенного обследования несущих конструкций каркаса здания был выявлен дефицит армирования, связанный с увеличением действующих нагрузок, а также влиянием сейсмических воздействий. Для обеспечения дальнейшей безопасной эксплуатации здания спроектирована и установлена композитная система армирования. Внешний вид исходных конструкций показан на рис. 6, *a*, после усиления — на рис. 6, *b*.

Аналогичные работы были проведены в здании главного офиса Омсктехуглерод, г. Омск.

Табл. 2. Объекты внедрения технологии внешнего армирования композитными СВА

Table 2. Objects of implementation of technology of external reinforcement with composite systems

Наименование объекта, географическое расположение Name of the bridge, geographical location
Исторический музей, г. Москва Historical Museum, Moscow
Дом Правительства РФ, г. Москва House of the Government of the Russian Federation, Moscow
Международный центр бокса и самбо Лужники, г. Москва International Boxing and Sambo Center Luzhniki, Moscow
Жилой дом в Тверской области, г/п г. Конаково Residential building in the Tver region, urban settlement Konakovo
9-этажные жилые дома, расположенные по адресу: г. Норильск, район Центральный, ул. 50 лет Октября, д. 2Б и 2В 9-storey residential buildings located at the address: 2B and 2V build., 50 Let Oktyabrya street, Central district, Norilsk
Музей Мирового океана, расположенный по адресу: г. Калининград, наб. Петра Великого, д. 1 Museum of the World Ocean, located at the address: 1 emb. Peter the Great, Kaliningrad
Метрополитен, г. Екатеринбург, станция метро Ботаническая Underground station. Yekaterinburg, Botanicheskaya underground station, Yekaterinburg
Гимназия им. А.И. Яковлева, расположенная по адресу: Ханты-Мансийский автономный округ — Югра, г. Урай, мкр. Западный, д. 8 Gymnasium named after A.I. Yakovleva, located at the address: 8 microdistrict. Zapadny microdistrict, Urai city, Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug — Ugra
Здание ж/д вокзала, расположенное по адресу: Московский вокзал г. Санкт-Петербург, Невский пр., д. 85 Railway station building, located at the address: 85 Nevsky Prospect, St. Petersburg, Moskovsky Station
Здание казармы, расположенное по адресу: г. Челябинск, пр. Победы, д. 187 Barracks building, located at the address: 187 Pobedy Ave., Chelyabinsk
Путепровод на ПК 3+60,725 ж/д пути Октябрьской железной дороги на 1273 км АНОФ-2 КФ АО «Апатит» Overpass on PK 3+60.725 railway track of the Oktyabrskaya Railway at 1273 km ANOF-2 KF JSC “Apatit”
Мост КМ 926+532 (в границах 927 км ПК6 2 путь Коинсар – Кукмор). Железнодорожный мост, усиление балок Bridge KM 926+532 (within the boundaries of 927 km PK6 2 route Koinsar – Kukmor). Railway bridge, reinforcement of beams
Многофункциональный гостиничный комплекс курортного типа (5 звезд), расположенный по адресу: г. Владивосток, ул. Набережная, д. 13 Multifunctional resort-type hotel complex (5 stars), located at the address: 13 Naberezhnaya street, Vladivostok

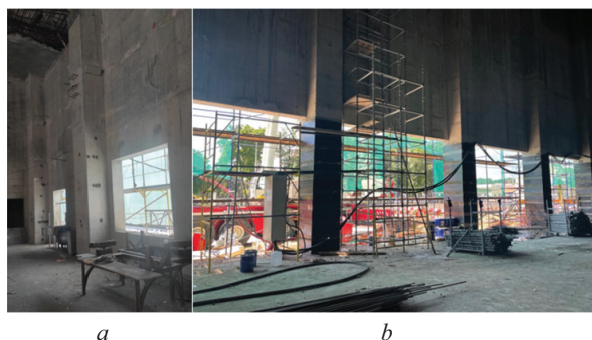


Рис. 5. Несущие конструкции центра Лужники: *a* — до усиления; *b* — после усиления

Fig. 5. Load-bearing structures of the Luzhniki centre: *a* — before reinforcement; *b* — after reinforcement



Рис. 6. Несущие конструкции буддийского храма: *a* — до усиления; *b* — после усиления

Fig. 6. Load-bearing structures of a Buddhist temple: *a* — before reinforcement; *b* — after reinforcement

РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате обследования монолитного каркаса здания обнаружены отклонения от проектного класса прочности бетона несущих перекрытий и вертикальных конструкций, также по результатам расчета был выявлен дефицит армирования несущих конструкций.

Внешний вид объекта при проведении подготовительных мероприятий представлен на рис. 7, *a*, после усиления с помощью композитных СВА — на рис. 7, *b*.

Использование разработанных материалов и технологий на эксплуатируемых сооружениях позволило в установленные сроки осуществить усиление конструкций в комплексе с системой оптического мониторинга и продлить ресурс их эксплуатации с учетом обеспечения требуемого уровня нагрузок и безопасности.



Рис. 7. Здание Омсктехуглерод: *a* — подготовительные мероприятия перед установкой СВА; *b* — результаты усиления

Fig. 7. Omsktekhuglerod building: *a* — preparatory measures before installing of the external reinforcement system; *b* — results of reinforcement

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение современных методов оптического мониторинга для сооружений строительной, транспортной, энергетической и других отраслей промышленности позволяет с высокой достоверностью оценивать фактическое состояние сложных технических систем, обеспечивая должный уровень безопасности эксплуатации, что особенно важно для объектов стратегического назначения.

Показано, что структура системы мониторинга, включая пространственную топологию датчиков, проектируется под конкретный объект с учетом особенностей его эксплуатации. Эта система эффективно применяется как для вновь возводимых, так и для существующих конструкций, имеющих эксплуатационные повреждения. Поврежденные конструкции с пониженной несущей способностью и грузоподъемностью целесообразно восстанавливать композитными материалами в комплексе с системой непрерывного мониторинга.

Приведенные результаты экспериментальных исследований и внедрения разработанных технологий для ряда объектов, включая гидротехнические сооружения, жилые здания, стадионы, автомобильные и железнодорожные мосты, дают возможность сделать вывод об эффективности реализованных решений и перспективности дальнейшего развития и широкого использования для объектов строительной индустрии.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кальгин А.А. Обращение с отходами // Строительство. Экономика и управление. 2022. № 2 (46). С. 16–23. EDN BFQXEN.
2. Кальгин А.А. Функциональная иерархия принятия решений // Academia. Архитектура и строительство. 2018. № 1. С. 88–91. DOI: 10.22337/2077-9038-2018-1-88-91. EDN YWPFHA.
3. Теличенко В.И., Липидус А.А., Слесарев М.Ю. Риски интеграции технологий искусственного интел-

- лекта в «зеленые» стандарты // Промышленное и гражданское строительство. 2023. № 8. С. 102–108. DOI: 10.33622/0869-7019.2023.08.102-108. EDN ARDRBK.

4. Теличенко В.И., Липидус А.А., Слесарев М.Ю. Анализ и синтез образов экологически ориентированных инновационных технологий строительного производства // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. № 8. С. 1298–1305. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.8.1298-1305

5. Теличенко В.И. Комплексная безопасность строительства // Вестник МГСУ. 2010. № 4–1. С. 10–17. EDN NEJDCN.

6. 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. EDN ULQNQN.

7. Овчинников И.И., Овчинников И.Г. О причинах аварий и повреждений транспортных и других инженерных сооружений // Ресурсоэнергоэффективные технологии в строительном комплексе региона. 2021. № 1 (13). С. 186–193. EDN FDVYSD.

8. Gusev B.V., Fedotov M.Yu., Leshchenko V.V., Lepikhin A.M., Makhutov N.A., Budadin O.N. Non-destructive testing of offshore subsea pipelines and calculation substantiation of their safety according to risk criteria // Chemical and Petroleum Engineering. 2023. Vol. 58. Issue 9–10. Pp. 776–787. DOI: 10.1007/s10556-023-01161-0

9. Беккер А.Т., Уманский А.М. Полимерное связующее композитной арматуры. Виды, характеристики и перспективы к модификации // Вестник науки и образования. 2018. № 3 (39). С. 22–25.

10. Гусев Б.В., Будадин О.Н., Федотов М.Ю., Козельская С.О., Шелемба И.С. Опыт мониторинга технического состояния и усиления поврежденных строительных конструкций полимерными композиционными материалами // Вопросы оборонной техники. Научно-технический сборник. Серия 15. Композиционные неметаллические материалы в машиностроении. 2020. № 3–4. С. 85–94.

11. Yang M., Xu H. Application of fiber Bragg grating sensing technology and physical model in bridge detection // Results in Physics. 2023. Vol. 54. P. 107058. DOI: 10.1016/j.rinp.2023.107058

12. Shahmirzaloo A., Manconi M., van den Hurk B., Xu B., Blok R., Teuffel P. Numerical and experimental validation of the static performance of a full-scale flax fiber-polyester composite bridge model to support the design of an innovative footbridge // Engineering

Structures. 2023. Vol. 291. P. 116461. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.116461

13. Altabey W.A., Wu Z., Noori M., Fathnejat H. Structural health monitoring of composite pipelines utilizing fiber optic sensors and an ai-based algorithm — a comprehensive numerical study // Sensors. 2023. Vol. 23. Issue 8. P. 3887. DOI: 10.3390/s23083887

14. Alwis L., Bremer K., Roth B. Fiber optic sensors embedded in textile-reinforced concrete for smart structural health monitoring : A review // Sensors. 2021. Vol. 21. Issue 15. P. 4948. DOI: 10.3390/s21154948

15. Fouad N., Saifeldeen M.A. Smart self-sensing fiber-reinforced polymer sheet with woven carbon fiber line sensor for structural health monitoring // Advances in Structural Engineering. 2021. Vol. 24. Issue 1. Pp. 17–24. DOI: 10.1177/1369433220944507

16. Lau K.-T., Zhou L.-M., Tse P.-C., Yuan L.-B. Applications of composites, optical fibre sensors and smart composites for concrete rehabilitation : An overview // Applied Composite Materials. 2002. Vol. 9. Pp. 221–247. DOI: 10.1023/a:1016051903029

17. Watkins S.E. Smart bridges with fiber-optic sensors // IEEE Instrumentation & Measurement Magazine. 2003. Vol. 6. Issue 2. Pp. 25–30. DOI: 10.1109/mim.2003.1200280

18. Ларин А.А., Федотов М.Ю. Конструктивные решения для мониторинга фундаментов на Крайнем Севере // Промышленное и гражданское строительство. 2023. № 1. С. 43–50. DOI: 10.33622/0869-7019.2023.01.43-50. EDN PIDVKE.

19. Бростилова Т.Ю., Бростилов С.А., Мурашкина Т.И. Волоконно-оптический датчик деформации // Надежность и качество сложных систем. 2013. № 1 (1). С. 93–99. EDN RDVFSZ.

20. Федотов М.Ю., Ларин А.А. Особенности формирования пространственной топологии волоконно-оптической системы мониторинга свайных фундаментов в условиях Крайнего Севера // Контроль. Диагностика. 2023. Т. 26. № 2 (296). С. 42–51. DOI: 10.14489/td.2023.02.pp.042-051. EDN VLYIZH.

Поступила в редакцию 13 декабря 2023 г.

Принята в доработанном виде 21 декабря 2023 г.

Одобрена для публикации 26 декабря 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: Михаил Юрьевич Федотов — заместитель президента; Российская инженерная академия (РИА); 125009, г. Москва, Газетный пер., д. 9, стр. 4; fedotovmyu@gmail.com;

Александр Анатольевич Кальгин — заместитель президента; Российская инженерная академия (РИА); 125009, г. Москва, Газетный пер., д. 9, стр. 4; alexander.kalgin@mail.ru;

Евгений Евгеньевич Шмойлов — главный эксперт департамента исследований и разработок; АО «Препрег-Современные Композиционные Материалы» (АО «Препрег-СКМ»); 109316, г. Москва, Волгоградский пр-т, д. 42, корп. 5; e.shmoylov@umatex.ru;

Павел Дмитриевич Капырин — начальник научно-технического управления; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; kapyrin@mgsu.ru;

Олег Александрович Корнев — заместитель директора Научно-исследовательского института экспериментальной механики (НИИ ЭМ); **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; i@okornev.ru.

Вклад авторов:

Федотов М.Ю. — написание введения, обработка результатов исследования.

Кальгин А.А. — написание введения, обработка результатов исследования, научное редактирование текста.

Шмойлов Е.Е. — обработка результатов исследования, научное редактирование текста.

Капырин П.Д. — научное редактирование текста, руководство проектом.

Корнев О.А. — написание заключения, руководство проектом.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Kalgin A.A. Waste management. *Construction. Economics and Management*. 2022; 2(46):16-23. EDN BFQXEN. (rus.).
2. Kalgin A.A. Functional hierarchy in decision making. *Academia. Architecture and Construction*. 2018; 1:88-91. DOI: 10.22337/2077-9038-2018-1-88-91. EDN YWPFHA. (rus.).
3. Telichenko V.I., Lapidus A.A., Slesarev M. Yu. Risks of integrating artificial intelligence technologies into “green” standards. *Industrial and Civil Engineering*. 2023; 8:102-108. DOI: 10.33622/0869-7019.2023.08.102-108. EDN ARDRBK. (rus.).
4. Telichenko V.I., Lapidus A.A., Slesarev M. Yu. Analysis and synthesis of images of environmentally oriented innovative technologies of construction production. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(8):1298-1305. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.1298-1305. (rus.).
5. Telichenko V.I. Complex safety of building. *Bulletin of MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2010; 4-1:10-17. EDN NEJDCN. (rus.).
6. Ivannikov V.V., Nikolaev A.G., Shvarts V.M., Ryabov O.B., Stepanov V.N. Characteristic defects and damage to metal structures. *Chemical Technology*. 2015; 7:7. EDN ULQNQN. (rus.).
7. Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G. About causes of accidents and damages of transportation and other engineering constructions. *Resource and energy efficient technologies in the construction complex of the region*. 2021; 1(13):186-193. EDN FDVYSD. (rus.).
8. Gusev B.V., Fedotov M.Yu., Leshchenko V.V., Lepikhin A.M., Makhutov N.A., Budadin O.N. Nondestructive testing of offshore subsea pipelines and calculation substantiation of their safety according to risk criteria. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2023; 58(9-10):776-787. DOI: 10.1007/s10556-023-01161-0
9. Bekker A.T., Umanskii A.M. Polymer binder of composite reinforcement. Types, characteristics and prospects of modification. *Bulletin of Science and Education*. 2018; 3(39):22-25. (rus.).
10. Gusev B.V., Budadin O.N., Fedotov M.Yu., Kozelskaya S.O., Shelemba I.S. Experience in monitoring the technical condition and strengthening of damaged building structures with polymer composite materials. *Questions of defense technology. Scientific and technical collection. Series 15. Composite non-metallic materials in mechanical engineering*. 2020; 3-4:85-94. (rus.).
11. Yang M., Xu H. Application of fiber Bragg grating sensing technology and physical model in bridge detection. *Results in Physics*. 2023; 54:107058. DOI: 10.1016/j.rinp.2023.107058
12. Shahmirzaloo A., Manconi M., van den Hurk B., Xu B., Blok R., Teuffel P. Numerical and experimental validation of the static performance of a full-scale flax fiber-polyester composite bridge model to support the design of an innovative footbridge. *Engineering Structures*. 2023; 291:116461. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.116461
13. Altabey W.A., Wu Z., Noori M., Fathnejat H. Structural health monitoring of composite pipelines utilizing fiber optic sensors and an AI-based algorithm — a comprehensive numerical study. *Sensors*. 2023; 23(8):3887. DOI: 10.3390/s23083887
14. Alwis L., Bremer K., Roth B. Fiber optic sensors embedded in textile-reinforced concrete for smart structural health monitoring : A review. *Sensors*. 2021; 21(15):4948. DOI: 10.3390/s21154948
15. Fouad N., Saifelddeen M.A. Smart self-sensing fiber-reinforced polymer sheet with woven carbon fiber line sensor for structural health monitoring. *Advances in Structural Engineering*. 2021; 24(1):17-24. DOI: 10.1177/1369433220944507
16. Lau K.-T., Zhou L.-M., Tse P.-C., Yuan L.-B. Applications of composites, optical fibre sensors and smart composites for concrete rehabilitation : An overview. *Applied Composite Materials*. 2002; 9:221-247. DOI: 10.1023/a:1016051903029
17. Watkins S.E. Smart bridges with fiber-optic sensors. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*. 2003; 6(2):25-30. DOI: 10.1109/mim.2003.1200280
18. Larin A.A., Fedotov M.Yu. Constructive solutions for monitoring foundations in the Far North. *Industrial and*

Civil Engineering. 2023; 1:43-50. DOI: 10.33622/0869-7019.2023.01.43-50. EDN PIDVKE. (rus.).

19. Brostilova T.Yu., Brostilov S.A., Murashkina T.I. Fiber-optic strain sensor. *Reliability and Quality of Complex Systems*. 2013; 1(1):93-99. EDN RDVFSZ. (rus.).

20. Fedotov M.Yu., Larin A.A. Features of the formation of the spatial topology of the fiber-optic system of monitoring pile foundations in the conditions of the Far North. *Control. Diagnostics*. 2023; 26(2):(296):42-51. DOI: 10.14489/td.2023.02.pp.042-051. EDN VLYIZH. (rus.).

Received December 13, 2023.

Adopted in revised form on December 21, 2023.

Approved for publication on December 26, 2023.

B I O N O T E S : **Mikhail Yu. Fedotov** — Vice president; **Russian Academy of Engineering (RAE)**; build. 4, 9 Gazetny lane, Moscow, 125009, Gazetny lane, Russian Federation; fedotovmyu@gmail.com;

Alexander A. Kalgin — Vice president; **Russian Academy of Engineering (RAE)**; build. 4, 9 Gazetny lane, Moscow, 125009, Gazetny lane, Russian Federation; alexander.kalgin@mail.ru;

Evgeniy E. Shmoilov — Chief expert of the Research and Development Department; **Joint-stock company “Prepreg – Advanced Composite Materials”**; build. 5, 42 Volgogradsky prospekt, Moscow, 109316, Russian Federation; e.shmoilov@umatex.ru;

Pavel D. Kapyrin — Head of Scientific and Technical Management; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; kapyrin@mgsu.ru;

Oleg A. Kornev — Deputy director of the Research Institute of Experimental Mechanics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; i@okornev.ru.

Authors' contributions:

Mikhail Yu. Fedotov — writing an introduction, processing research results.

Alexander A. Kalgin — writing an introduction, processing research results, scientific editing of the text.

Evgeniy E. Shmoilov — processing of research results, scientific editing of the text.

Pavel D. Kapyrin — scientific editing of the text, project management.

Oleg A. Kornev — writing conclusions, project management.

The authors declare no conflict of interest.