

На правах рукописи



БРЮХОВА Анна Сергеевна

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ
КОНТРОЛЯ КОРРОЗИОННОГО СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ
КОНСТРУКЦИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ СПЕКТРАЛЬНЫХ МЕТОДОВ
АНАЛИЗА МАТЕРИАЛОВ**

Специальность 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды,
веществ, материалов и изделий

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

ОМСК 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения»

Научный руководитель: **Кузнецов Андрей Альбертович**,
д.т.н, профессор.

Официальные оппоненты: **Сидоров Александр Иванович**,
д.т.н., профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», заведующий кафедрой «Безопасность жизнедеятельности».

Иванов Геннадий Викторович,
к.т.н., доцент, Тобольский индустриальный институт - филиал Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тюменский индустриальный университет», заведующий кафедрой «Электроэнергетика».

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения», г. Екатеринбург.

Защита состоится 2 декабря 2020 г. в 14:00 часов в зале заседания диссертационного совета на заседании диссертационного совета Д 212.178.01, созданного на базе ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет» по адресу: 644050, г. Омск, пр. Мира, 11, Главный корпус, П-202.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОмГТУ и на сайте:

<http://omgtu.ru>

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью, просьба направлять по адресу: 644050, г. Омск, пр. Мира, 11, ОмГТУ, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.178.01. Тел.: (3812) 65-24-79, e-mail: dissov_omgtu@omgtu.ru

Автореферат разослан «___» _____ 2020 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
Д 212.178.01, кандидат технических наук, доцент



С. А. Завьялов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Исследования соответствуют основным направлениям Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации. Создание эффективных средств диагностирования и контроля за эксплуатацией потенциально опасных объектов, способных привести к крупным техногенным авариям представляет собой актуальную задачу. Железобетонные конструкции, используемые в системе энергетики (например, полые железобетонные опоры линий электропередач и другие) эксплуатируются в течение длительного времени. За время эксплуатации они подвержены влиянию различных агрессивных сред и факторов, которые приводят к зарождению и развитию коррозии, что в свою очередь влияет на прочность элементов и всей конструкции.

Согласно Стратегии научно-технического развития холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и перспективу до 2025 года и программе «Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 г.» необходимо повысить уровень безопасности производственных процессов и эксплуатационной готовности за счет исключения влияния «человеческого фактора» и внедрения современных систем контроля с использованием последних достижений науки и технологии.

В настоящее время в эксплуатации находится ряд приборов и методов оценки коррозионного состояния подземной части железобетонных конструкций, в том числе опор контактной сети, наиболее распространенными из которых являются электрохимический, акустический и вибрационный. Однако существующие приборы неразрушающего контроля не позволяют в эксплуатационных условиях своевременно и достоверно выявлять конструкции с истощенным ресурсом несущей способности, поскольку основаны на косвенных методах получения конечного результата с необходимостью проведения большого числа преобразований.

Сложившаяся ситуация вызывает необходимость проведения комплекса исследований для разработки прямых методик оценки присутствия продуктов коррозии на поверхности подземной части железобетонных конструкций, в том числе опор контактной сети и установления зависимости с прочностью, а следовательно, и остаточным ресурсом эксплуатации.

Перспективными представляются спектральные методы на основе лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии (ЛИЭС) и спектроскопии

комбинационного рассеяния (КРС) с лазерным возбуждением, способные реализовать прямой инструментальный контроль. Открывается возможность создания методик применения портативных приборов, способных работать в ограниченном пространстве.

Выявление коррозии на ранних сроках эксплуатации при помощи ранее не используемых для этих задач спектральных методов, определение режимов работы приборов и создание на этой основе мобильных мехатронных комплексов для диагностирования на основе цифровых технологий представляется актуальным исследованием.

Степень разработанности темы диссертации. Разработка методики и портативного прибора диагностирования коррозионного состояния железобетонных конструкций с использованием спектральных методов анализа в полевых условиях представляет собой сложную задачу, которая может быть решена совместными усилиями специалистов разных областей науки и техники. К наиболее значимым работам в области диагностирования железобетонных конструкций можно отнести исследования ученых: С. Н. Алексеева, В. С. Артамонова, И. Н. Ахвердова, В. И. Бабушкина, А. Л. Вайнштейна, А. Г. Галкина, Г. И. Горчакова, А. И. Гукова, Ю. В. Демина, Ф. М. Иванова, А. А. Ковалева, В. А. Кандаева, В. Г. Каратаева, И. А. Корнфельда, А. В. Котельникова, Т. Г. Кравченко, А. А. Кудрявцева, К. Б. Кузнецова, О. В. Кунцевича, В. М. Москвина, А. М. Подвального, В. И. Подольского, Э. П. Селедцова.

Значительный вклад в развитие спектральных методов контроля различных объектов и технических средств внесли ученые Н. Б. Зоров, И. Е. Васильева, А. А. Кузнецов, В. А. Лабусов, Т. А. Лабутин, А. А. Пупышев, David A. Cremers, Leon J. Radziemski, Steven Millar, Gerd Wilsch и др.

Но, несмотря на это, до настоящего времени основным видом диагностирования железобетонных конструкций является визуальный метод, который имеет ряд недостатков. Известные методы диагностирования железобетонных конструкций не способны своевременно и достоверно выявлять опоры с истощенным ресурсом, поскольку заключение о коррозионном состоянии дается по косвенным параметрам. Поэтому нельзя считать полностью истощенной проблему разработки метода оценки коррозионного состояния железобетонных конструкций.

Целью диссертационной работы является разработка методических основ оценки коррозионного состояния железобетонных конструкций транспортной инфраструктуры, путем контроля продуктов коррозии на

труднодоступных поверхностях и установления количественной взаимозависимости изменения сечения арматурных стержней от концентрации продуктов коррозии на их поверхности, а также создания технических средств с использованием технологии лазерно-искровой эмиссионной спектрометрии.

Для достижения цели диссертационной работы были поставлены следующие научно-технические задачи:

1. Произвести обзор методов диагностирования коррозионного состояния железобетонных конструкций, с целью выявления недостатков и достоинств существующих методов, обоснования применения спектральных методов в зависимости от особенностей объекта контроля.

2. Выполнить экспериментальные исследования с применением технологии спектрального анализа образцов с различной степенью коррозии.

3. Исследовать факторы, влияющие на степень распространения коррозии тонкостенных железобетонных конструкций в направлении от арматурного стержня к поверхности, и определить взаимосвязь с выходным параметром – интенсивностью спектральных линий характерных элементов.

4. Разработать математическую модель контроля коррозионного состояния железобетонных конструкций по данным спектрального анализа продуктов коррозии на их поверхности.

5. Разработать методику и технические средства, реализующие неразрушающий контроль коррозионного состояния железобетонных конструкций с использованием спектральных методов анализа.

Объектом исследования являются методика и технические средства диагностирования коррозионного состояния железобетонных конструкций транспортной инфраструктуры.

Предметом исследования являются спектральные методы контроля для определения содержания продуктов коррозии железобетонных конструкций и их связь с состоянием арматурных стержней.

Научная новизна работы:

1. Разработана математическая модель контроля коррозионного состояния железобетонных конструкций, которая позволила предложить и подтвердить гипотезу о существовании причинно-следственной связи между воздействием агрессивных сред и изменением прочностных характеристик железобетонных конструкций. Установлено, что под воздействием проникновения агрессивных сред происходит необратимая деградация

стальной арматуры, находящейся внутри бетона, уменьшается ее сечение, тем самым снижаются прочностные характеристики железобетонных опор.

2. Экспериментальные исследования с применением технологии спектрального анализа на образцах с различной степенью коррозии, позволили определить спектральные линии Fe (275,574), Fe (330,720), Si (288,158), Na (819,482), Cl (837,59), Ca (854,209) нм, свидетельствующие о наличии коррозии. По данным испытаний образцов сравнения получен вывод о том, что образец с большим содержанием продуктов коррозии имеет наибольшее значение относительной интенсивности спектральной линии железа.

3. По результатам измерений и анализа образцов с различной степенью коррозии, выполненных на приборах спектрального анализа, подтверждена возможность и эффективность предложенного метода в задачах диагностирования и определения коррозионного состояния железобетонных конструкций. Результаты, полученные при помощи предложенной методики и технических средств лазерно-искровой эмиссионной спектрометрии, подтверждены данными широко распространенного метода атомно-эмиссионной спектрометрии с искровым возбуждением спектра.

Практическая значимость работы заключается в том, что:

1. Предложена практическая реализация разработанной методики совместно с автоматизированным мехатронным комплексом для контроля коррозионного состояния полых железобетонных конструкций, заглубленных в грунт в условиях эксплуатации.

2. Практическая реализация методики прямого контроля количественного содержания продуктов коррозии металлических арматурных стержней на поверхности железобетонных конструкций, с использованием спектральных методов анализа на основе переносного лазерно-искрового спектрометра, позволяющая повысить достоверность контроля.

3. Предложены методики градуирования спектральных приборов с использованием образцов сравнения, созданных на основе добавок известного содержания продуктов коррозии на основе зависимости относительной интенсивности спектральных линий от концентрации продуктов коррозии на поверхности железобетона.

Соответствие содержания диссертации паспорту научной специальности. Представленная диссертация соответствует п. 3 «Разработка, внедрение и испытания приборов, средств и систем контроля природной среды, веществ, материалов и изделий, имеющих лучшие характеристики по

сравнению с прототипами» и п.4 «Разработка методического, технического, приборного и информационного обеспечения для локальных, региональных и глобальных систем экологического мониторинга природных и техногенных объектов» паспорта специальности ВАК 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий.

Методология и методы исследования:

Теоретические и экспериментальные исследования проводились с применением методов планирования эксперимента, статистической обработки данных, дисперсионного и корреляционного анализов. В процессе расчетов и анализа математических зависимостей применялись электронные таблицы, специализированный пакет программ *Statistica 10*. Реализация алгоритма управления устройства позиционирования оптического преобразователя осуществлялась на языке *C ++*. Для построения градуировочных зависимостей использовались стандартные образцы и специализированное программное обеспечение промышленного спектрометра *SP63* © ООО «*Spectrosoft*». Для повышения точности и воспроизводимости результатов измерения, применялись алгоритмы цифровой обработки изображения.

Положения, выносимые на защиту:

1. Способ контроля коррозионного состояния железобетонных конструкций с труднодоступными поверхностями в условиях транспортной инфраструктуры на основе спектрального метода анализа, обладающий преимуществами по сравнению с существующими – быстроедействие, достоверность, возможность использования в полевых условиях.

2. Математическая модель изменения количественного содержания продуктов коррозии на поверхности железобетонных конструкций при коррозионном разложении металлических арматурных стержней в условиях воздействия влияющих факторов в виде функциональной зависимости изменения концентрации продуктов коррозии на поверхности от количества металла, вышедшего из арматурного стержня.

3. Способ градуирования спектральных приборов с использованием образцов сравнения, созданных с добавлением известного содержания продуктов коррозии на основе зависимости относительной интенсивности спектральных линий от концентрации продуктов коррозии на поверхности железобетона и подтверждение адекватности экспериментальных методов определения коррозионного состояния, выполненные с применением

экспертных средств контроля, основанных на различных физических принципах.

Степень достоверности научных положений и результатов, подтверждена экспериментальными исследованиями, использованием аттестованных методов измерений, поверенного оборудования, утвержденных стандартных образцов количественного состава, использованием методов планирования эксперимента, методов математической статистики, а также достаточной степенью согласования расчетных и экспериментальных данных (расхождение составляет не более 8%). Адекватность разработанных математических моделей проверена при помощи критерия Фишера.

Апробация работы. Положения диссертационной работы доложены на 10 научно-технических конференциях и семинарах: XI Международной *IEEE* научно-технической конференции «Динамика систем, механизмов и машин» (г. Омск, 2017 г.). II Всероссийской научной конференции «Оптика кристаллов и наноструктур» ОКиН (г. Хабаровск, 2018). XXVIII Международный научный симпозиум «Метрология и метрологическое обеспечение 2018» (г. Созополь, Болгария, 2018). III всероссийская научно-техническая конференция «Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте» (г. Омск, 2018). X Международной научно-технической конференции «Научные проблемы реализации транспортных проектов в Сибири и на Дальнем Востоке» (г. Новосибирск, 2018). III Научно-технической конференции «Приборы и методы неразрушающего контроля качества изделий и конструкций из композиционных и неоднородных материалов» НККМ-2018 (г. Санкт-Петербург 2018). IV Международная сетевая научно-техническая конференция «Интеграционные процессы в научно-техническом и образовательном пространстве» (г. Бишкек, Киргизская Республика, 2018). Международная научно-техническая конференция «Пром-Инжиниринг» (г. Москва, 2018). 61-я международная сетевая научно-техническая конференция «Научно-инновационные технологии: идеи, исследования и разработки» (г. Бишкек, Киргизская Республика, 2019). XIII научная конференция «Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте» (г. Омск, 2019).

Публикации. Основные положения диссертационного исследования изложены в 11 научных работах, в том числе три опубликованы в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки

России, и одна статья издания, индексируемом в международной реферативной базе данных Scopus.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, общих выводов, заключения и списка литературы из 153 наименований. Диссертация изложена на 159 страницах основного машинописного текста, иллюстрируется 87 рисунками, 17 таблицами, 2 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы диссертации, поставлена цель работы, сформулированы задачи исследований и основные результаты, выносимые на защиту, а так же приведена степень разработанности проблемы, указана научная новизна и практическая ценность полученных результатов.

Первая глава диссертационной работы посвящена анализу технического состояния общего парка опор КС, приводится описание объекта контроля и результаты анализа дефектов.

Наиболее распространенной причиной выхода из строя опор контактной сети является коррозия арматурного стержня, вызывающая разрушение бетона и, как следствие, падение опор.

На основе достижений Российских и зарубежных ученых, произведен анализ методов и средств диагностирования коррозионного состояния полых железобетонных конструкций, выявлены их основные недостатки. Также рассмотрено применение в мировой практике методов спектрального анализа материалов.

Анализ существующих методов диагностирования коррозионного состояния полых железобетонных конструкций показал заинтересованность и актуальность исследуемой области. Для контроля коррозионного состояния применяются следующие методы: визуальные, акустические, электрохимические, электромагнитные. Все перечисленные методы решают задачу выявления дефектных опор лишь отчасти, поскольку являются косвенными и трудоемкими.

Применение метода визуального осмотра является в настоящее время наиболее применимым, но нет возможности диагностирования внутренней поверхности опоры и невозможно объективно дать оценку остаточного ресурса опоры.

В связи с этим возникает необходимость применения методов производительного и прямого контроля для определения степени коррозионного состояния и остаточного ресурса опоры.

Таким образом, в дальнейшей работе рассматривается применение спектральных методов анализа в задачах диагностирования коррозионного состояния железобетона, разработка методологии проведения контроля и прибора, с возможностью применения в полевых условиях.

На основе анализа, произведенного в первой главе, сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе представлены результаты разработки математической модели коррозионного состояния железобетонных конструкций. Установлено, что существует причинно-следственная связь между воздействием агрессивных сред и изменением прочностных характеристик железобетонных конструкций. Под воздействием проникновения хлоридосодержащих и сульфатосодержащих сред происходит необратимая деградация стальной арматуры, находящейся внутри бетона, тем самым снижая прочностные характеристики железобетонных опор. Модель проникновения агрессивной среды в железобетон описывается выражением:

$$C(\rho, t) = C_0 + \frac{C_0}{L(t)} (\rho - (R_1 - R_2)), \quad (1)$$

где $C(\rho, t)$ – концентрация хлоридов в точке с координатами ρ в момент времени t ; C_0 – концентрация хлоридов на поверхности железобетона; R_1 – наружный радиус опоры; R_2 – внутренний радиус опоры; $L(t)$ – закон продвижения границы размытого фронта вглубь конструктивного элемента, например: $L(t) = \alpha t^b$, где α и b – коэффициенты.

Определено, каким сторонним воздействиям подвергаются опоры в период эксплуатации и выявлены факторы, влияющие на скорость распространения коррозии железобетонных опор контактной сети. Для исследования факторов использовалась теория планирования эксперимента. Установлено, что такими факторами являются:

- концентрация агрессивных элементов,
- пористость бетонного камня (в том числе наличие трещин),
- время протекания электролиза,
- температура окружающей среды.

Наибольшее влияние на выходную переменную имеют следующие факторы – время (L) $g_{xy} = 0,46$ и пористость образцов (Порист (L)) $g_{xy} = 0,51$.

Математическая модель включает полином второй степени с парными влияниями факторов, выражение (2)

$$y_{pred} = a_0 + \sum_{i=1}^4 a_{2i} x_i^2 + \sum_{i=1}^4 a_{1i} x_i + \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 a_{ij} x_i x_j \quad (2)$$

Результирующая модель зависимости относительной интенсивности от четырех факторов с учетом их взаимодействия представляется выражением:

$$y_{pred} = 1,067 + 0,485x_1 + 0,399x_2 + 0,525x_3 + 0,152x_1x_3 + 0,088x_1x_4 + 0,072x_2x_4 + 0,420x_1^2 + 0,167x_4^2 \quad (3)$$

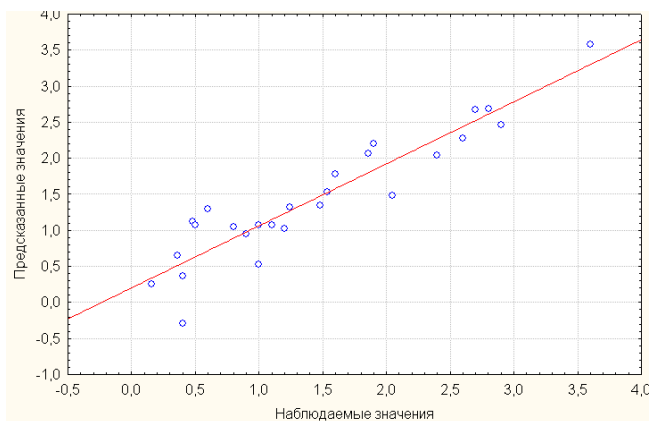


Рис. 1 – Наблюдаемые и предсказанные значения

Результат полученной математической модели представлен на рис. 1, что говорит, о линейности полученной функции. Остаточный член (дисперсия) по всем анализируемым опытам составил $SS = 0,279$ ($\delta_{ад} = 7,75\%$).

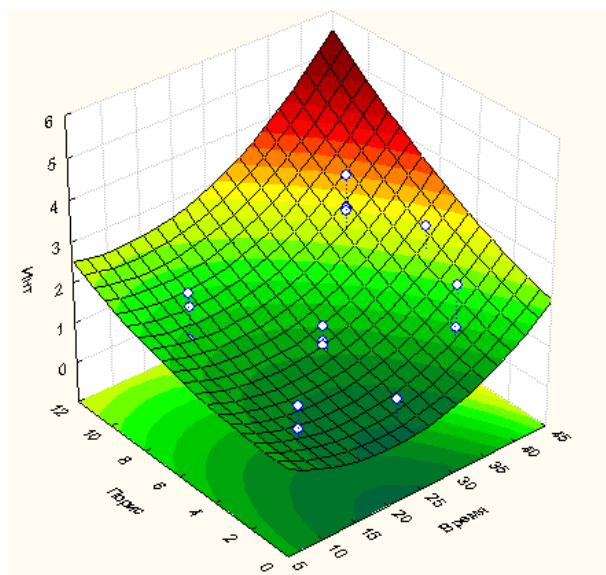
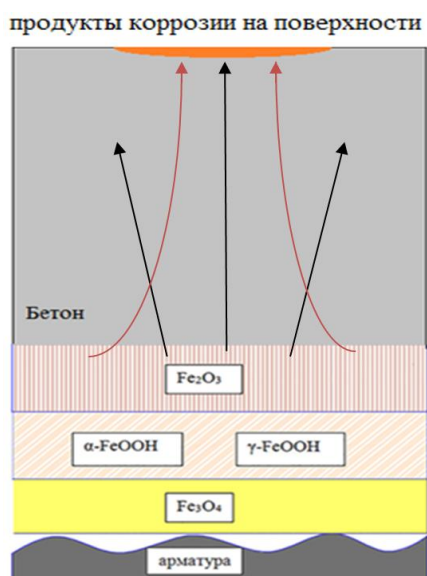


Рис. 2 – Анализ поверхности отклика в зависимости от факторов «Пористость» и «Время»

На рис. 2 представлена поверхность отклика зависимой переменной – относительной интенсивности спектральной линии железа в зависимости от сочетания таких факторов, как «пористость» и «время». Сочетание таких факторов дает наибольшее влияние на значение относительной интенсивности. Увеличение значения одного из факторов, увеличивает значение интенсивности спектральной линии, тем самым повышая скорость процесса протекания коррозии.

В третьей главе приведены результаты экспериментального исследования процесса коррозии железобетонных образцов.

Для подтверждения математической модели распространения коррозии проведены экспериментальные исследования с использованием изготовленных железобетонных образцов подвергнутых различной степени коррозии. Схема протекания коррозии арматурного стержня в бетоне представлена на рис. 3. Оксиды, гидроксиды, сульфаты и т.д., проникая сквозь поры и микротрещины бетона к арматуре, разрушают оксидный слой на поверхности арматурной стали, вызывая коррозию бетона и арматуры. Продукты коррозии арматуры имеют объем больше, чем сам металл, тем самым вызывают внутренние напряжения в бетоне и его растрескивание.



Для определения концентрации железа с продуктами коррозии, вышедших на поверхность бетона, разработана методика для прибора «Аргон-5СФ».

С поверхности бетона, где наблюдались следы коррозии, была собрана проба. Затем проба помещалась в графитовые электроды, для дальнейшего проведения спектрального анализа. Анализ производился согласно схеме, представленной на рис. 4.

Рис. 3 – Слои продуктов коррозии на поверхности углеродистой стали

Проведено испытание методики определения коррозионного состояния с использованием технических средств лазерной искровой эмиссионной спектрометрии – стационарной установки ЛИЭС и портативного прибора SciAps Z300. Определены параметры испытаний и спектральные линии, чувствительные к изменению концентрации продуктов коррозии на поверхности.

Спектры, полученные на экспериментальной установке ЛИЭС представлены на рис. 4, 5.

На рис. 4 изображены спектры двух образцов 3_grey (бетон с малым содержанием следов коррозии) и 3_ochre (бетон с большим содержанием коррозии) в диапазоне 316 – 336 нм. Спектральные линии железа были зарегистрированы на длинах волн 330,72; 336,67; 337,86 нм. По полученным

значениям интенсивности можно сделать вывод о том, что образец с большим содержанием продуктов коррозии имеет наибольшее значение интенсивности спектральной линии железа.

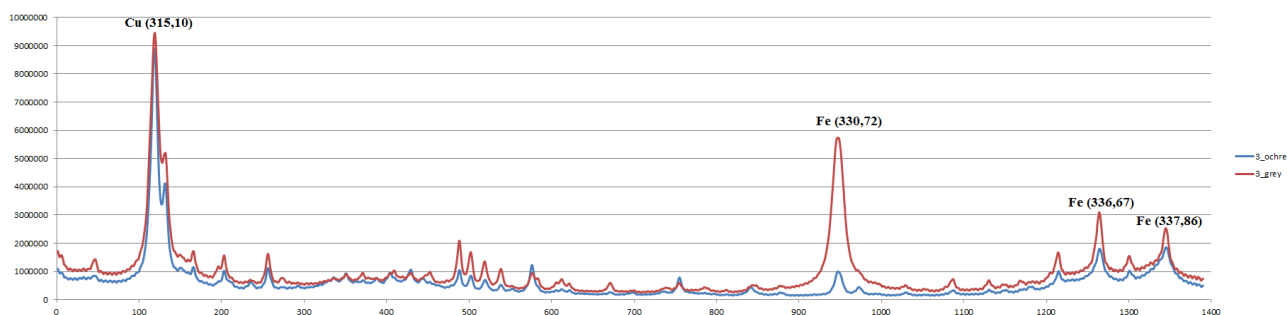


Рис. 4 – Спектры образцов с различной степенью коррозии (316 – 336 нм)

При помощи переносного спектрометра SciAps Z300 были проанализированы три образца с различным содержанием продуктов коррозии (аналогично, как и для стационарной установки ЛИЭС образцы 3_grey и 3_ochre, а также sample_5 – чистый бетон). Спектры, полученные прибором SciAps Z300 представлены на рис. 5, 6.



Рис. 5 – Спектры трех образцов с различным содержанием продуктов коррозии в диапазоне 255–289 нм

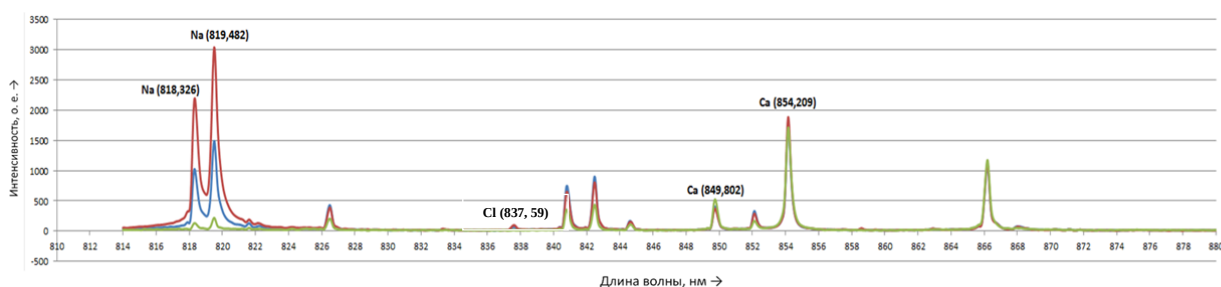


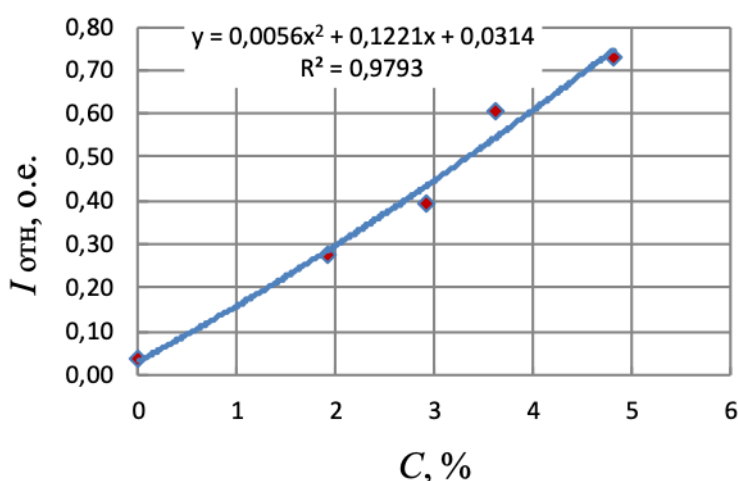
Рис. 6 – Спектры трех образцов с различным содержанием продуктов коррозии в диапазоне 810 – 880 нм.

Подтверждение результатов спектрального анализа проведенного по технологии ЛИЭС выполнено при помощи сертифицированного атомно-эмиссионного спектрометра типа «АРГОН-5СФ», по разработанной автором

методике контроля порошкообразных проб, определившего изменение продуктов коррозии на поверхности для различных железобетонных образцов.

Таким образом, по результатам измерений и анализа образцов с различной степенью коррозии, выполненных на трех приборах спектрального анализа, можно подтвердить возможность и эффективность использования спектрального анализа в задачах диагностирования и определения коррозионного состояния железобетонных конструкций.

По специально подготовленным образцам сравнения с добавлением $FeCl_3$ был построен градуировочный график в координатах концентрация железа (C , %) – относительная интенсивность (I отн), как показано на рис. 7. По полученной градуировочной зависимости возможно определение продуктов коррозии арматурных стержней в тонкотелых железобетонных конструкциях с их выходом на поверхность. Основным элементом для определения является железо в виде оксидов, гидроксидов и других его соединений, образующих продукты коррозии.



В качестве зависимости, построенной методом наименьших квадратов, использован полином второй степени. Коэффициент детерминации принял значение 0,9793.

Рис. 7 – Градуировочный график определения железа на поверхности бетона

Повышение точности и воспроизводимости предложено осуществлять за счет применения системы видеонаблюдения за низкотемпературной плазмой.

На основании градуировочных зависимостей изменения интенсивности параметров спектральных линий от концентрации продуктов коррозии на поверхности железобетонных изделий, были определены зависимости изменения сечения арматурных стержней от концентрации продуктов коррозии на их поверхности (рис. 8), подтвержденные методом рентгенографии.

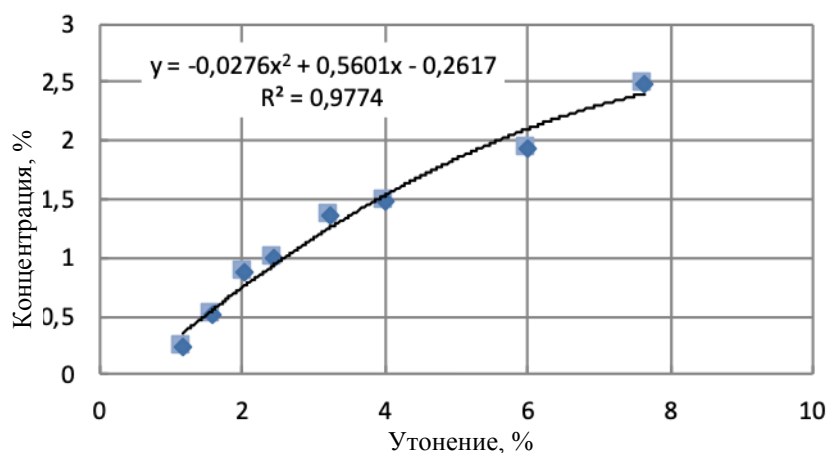


Рис. 8 – Градуировочный график изменения концентрации железа на поверхности бетона в зависимости от изменения поперечного сечения арматурных стержней

Адекватность градуировочного графика подтверждалась с помощью рассчитанного F-критерия Фишера (фактического). Установлено, что $F_{\text{факт}} > F_{\text{теор.}}$ ($106,196 > 5,79$), т. о. признается статистическая значимость уравнения в целом.

В четвертой главе разработано устройство для отбора пробы с труднодоступных поверхностей полых железобетонных конструкций, основанное на применении гибкого видеозендоскопа с рабочим органом в виде бормашины для получения порошкообразной пробы, ее подготовки для последующего проведения спектрального анализа. На рис. 9 представлено схематичное изображение устройства.

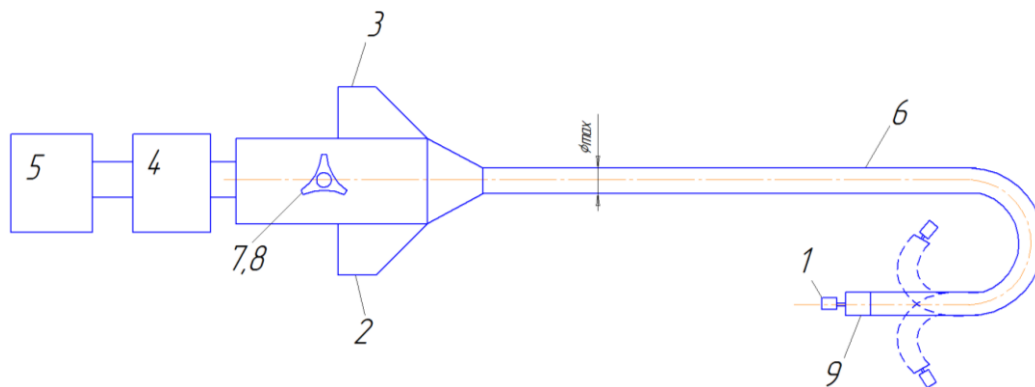


Рисунок 9 – Устройство отбора пробы с функцией эндоскопа:

- 1 – рабочий инструмент (бор); 2 – световод; 3 – инструментальное отверстие; 4 – ввод воздуха;
5 – резервуар для сбора пробы; 6 – погружаемая часть; 7,8 - органы управления
дистальной головкой; 9 – дистальная головка

Разработано устройство позиционирования оптического зонда в ограниченном пространстве для определения количественного содержания продуктов коррозии на поверхности железобетона. Описаны аппаратные

средства мобильного устройства перемещения блока измерительных преобразователей, реализованных на базе *Arduino*.

На рис. 10 изображена схема расположения устройства позиционирования оптического зонда для диагностирования внутренних поверхностей полых железобетонных конструкций. С помощью данного устройства можно производить контроль поверхности подземной части железобетонной опоры. Оптический зонд предназначен для определения количественного состава продуктов коррозии, вышедших на поверхность бетона средствами ЛИЭС.

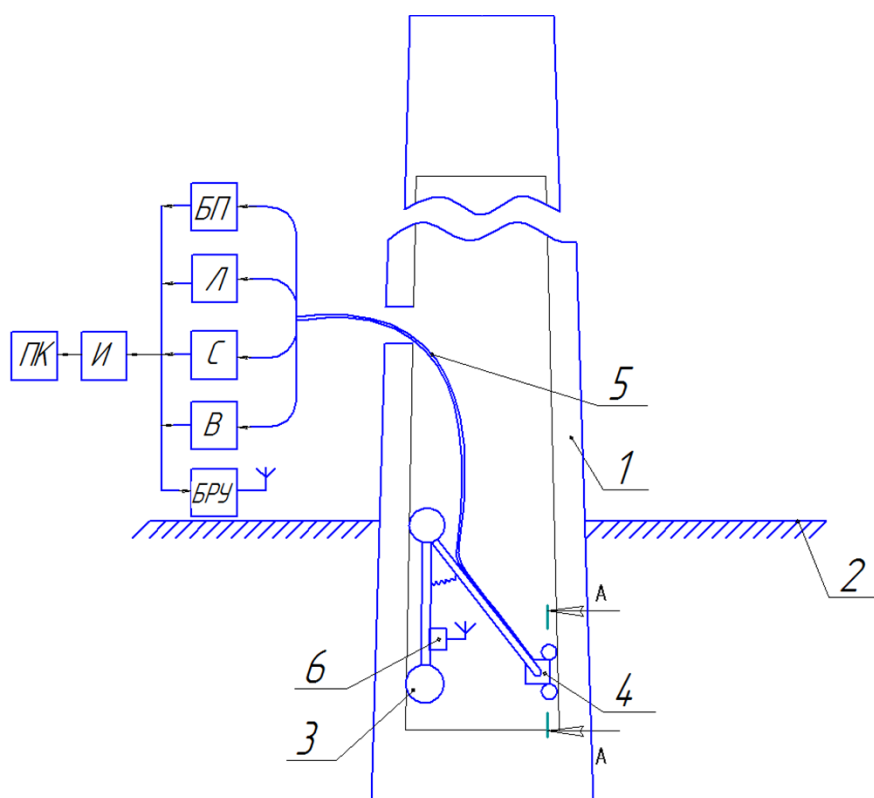


Рис. 10 – Схема расположения устройства внутри опоры КС:
1 – опора КС; 2 – грунт; 3 – ведущее колесо; 4 – оптический зонд;
5 – ВОК; 6 – блок радиопередачи

Устройство содержит блок питания (БП); лазер (Л); спектрометр (С); систему видеонаблюдения (В); блок радиопередачи (БРУ); интерфейс (И) и персональный компьютер (ПК).

Тележка с ведущими колесами 3, на которой расположен оптический зонд 4 и приемник блока радиопередачи 6, через технологическое отверстие помещается внутрь полый железобетонной опоры 1, заглубленной в грунт ниже поверхности земли 2. Связь оптического зонда с приборной частью, расположенной снаружи, осуществляется при помощи кабеля 5. В оболочке

кабеля располагаются два оптоволоконных канала для передачи оптического излучения лазера и приема отраженного света, электрический канал для питания светодиода и передачи сигнала от видеокамеры.

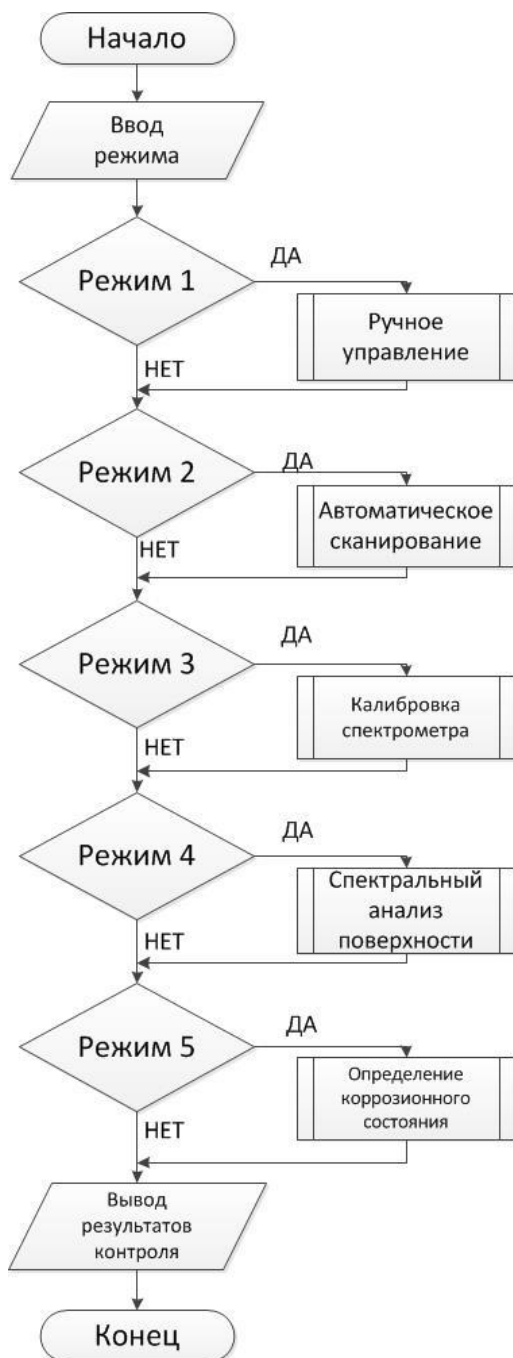


Рис. 11 – Алгоритм методики проведения контроля коррозионного состояния



Рис. 12 – Алгоритм подпрограммы «Проведение спектрального анализа»

Методика проведения спектрального анализа полых железобетонных опор отражена в алгоритме и представлена на рисунке 11. Алгоритм содержит основную программу, включающую выбор режима работы, пять подпрограмм и

вывод результатов контроля. При выборе «Режима 1» выполняется подпрограмма «Ручное управление». В этом режиме осуществляется ручное управление мобильной платформой и фотографическая съемка поверхности железобетонной конструкции.

При выборе «Режима 2» выполняется подпрограмма «Автоматическое сканирование». Перемещаясь на заданное расстояние, мобильная платформа производит непрерывное фотографирование поверхности бетона для создания полной картины состояния внутренней поверхности опоры. Оператор оценивает состояние опоры и координаты «бурого пятна» для дальнейшего проведения спектрального анализа.

Перед проведением спектрального анализа необходимо произвести калибровку прибора. Для этого выбирается «Режим 3». Алгоритм проведения спектрального анализа внутренней поверхности железобетонной опоры при выборе «Режим 4» представлен на рис. 12. Оператор задает координаты местонахождения «бурых пятен» и количество параллельных измерений. При достижении платформой заданной координаты, производится остановка двигателя и запуск лазера. По полученным значениям интенсивности железа определяют концентрацию продуктов коррозии, вышедшей на поверхность бетона. Контроль осуществляется для каждой потенциально дефектной зоны. Определение коррозионного состояния при выборе «Режима 5» осуществляется по значению предельно допустимой концентрации железа на поверхности бетона. По полученной концентрации определяют уменьшение сечения стальной арматуры и определяют снижение прочностных характеристик железобетонной опоры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований получены новые научно обоснованные технические и технологические решения, направленные на повышение достоверности контроля коррозионного состояния железобетонных конструкций.

Применение спектральных методов анализа позволит своевременно выявлять опоры КС с исчерпанным ресурсом эксплуатации.

Основные научные и практические результаты диссертационной работы состоят в следующем:

1. На основе анализа существующих методов диагностирования коррозионного состояния железобетонных конструкций установлено, что

большинство из них являются косвенными, в связи с этим обоснована разработка прямого метода контроля продуктов коррозии на поверхности железобетонных изделий и локация координат дефектов на труднодоступных поверхностях.

2. Разработанная математическая модель коррозионного состояния железобетонных конструкций позволила предложить и подтвердить гипотезу о том, что существует причинно-следственная связь между воздействием агрессивных сред и изменением прочностных характеристик железобетонных конструкций. Установлено, что под воздействием проникновения хлоридосодержащих и сульфатосодержащих сред происходит необратимая деградация стальной арматуры, находящейся внутри бетона, тем самым снижая прочностные характеристики железобетонных опор.

3. В результате проведенных экспериментальных исследований с применением технологии спектрального анализа на образцах с различной степенью коррозии спектральные линии железа были зарегистрированы на длинах волн 275,57; 330,72; 336,67 нм. По полученным значениям интенсивности можно сделать вывод о том, что образец с большим содержанием продуктов коррозии имеет наибольшее значение интенсивности спектральной линии железа. По результатам измерений и анализа образцов с различной степенью коррозии, выполненных на трех приборах спектрального анализа, можно подтвердить возможность и эффективность использования спектрального анализа в задачах диагностирования и определения коррозионного состояния железобетонных конструкций.

4. В результате экспериментов на образцах получен градуировочный график в координатах концентрация – относительная интенсивность. По полученной градуировочной зависимости возможно определение продуктов коррозии арматурных стержней в тонкотелых железобетонных конструкциях с их выходом на поверхность. Основным элементом для определения является железо в виде оксидов, гидроксидов и других его соединений, образующих продукты коррозии.

5. Исследованы факторы, влияющие на степень распространения коррозии тонкостенных железобетонных конструкций в направлении от арматурного стержня к поверхности, и определена их взаимосвязь с выходным параметром – интенсивностью спектральных линий железа, являющейся составляющей продуктов коррозии (Fe_3O_4 , $FeOOH$, Fe_2O_3). Выявлены наиболее значимые факторы – наличие влажной среды, концентрация хлоридов,

содержащихся в грунте и пористость бетона. На основании градуировочных зависимостей изменения интенсивности параметров спектральных линий от концентрации продуктов коррозии на поверхности железобетонных изделий, установлены зависимости изменения сечения арматурных стержней от концентрации продуктов коррозии на их поверхности, подтвержденные методом рентгенографии.

6. Предложена методика градуирования спектральных приборов с использованием образцов сравнения, созданных с добавлением известного содержания продуктов коррозии на основе зависимости относительной интенсивности спектральных линий от концентрации продуктов коррозии на поверхности железобетона, опробованная при помощи переносного спектрометра на основе технологии лазерно-искровой эмиссионной спектрометрии типа SciAps Z300. Разработанная методика позволяет использовать полученные результаты для различной степени и условия коррозии.

В качестве рекомендаций и перспективы дальнейшей разработки темы диссертации предлагается разработка методики оценки остаточного ресурса и прочностных характеристик железобетонных конструкций на основе предложенного способа контроля концентрации продуктов коррозии и изменения сечения арматурных стержней с использованием спектрального анализа труднодоступных поверхностей.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Научные работы, в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России:

1. Брюхова, А. С. Повышение точности средств аналитического контроля при обеспечении идентичных условий испытаний / А. А. Кузнецов, А. С. Брюхова, К. В. Усачева, Д. В. Муравьев // Омский научный вестник. – 2017. – № 6 (156), – С. 116 – 121.

2. Брюхова, А. С. Определение количественного содержания продуктов коррозии на поверхности железобетонных изделий / А. А. Кузнецов, А. С. Брюхова. – DOI: 10.25206/1813-8225-2018-162-160-164 // Омский научный вестник. – 2018. – № 6 (162). – С. 160 – 164.

3. Брюхова, А. С. Система позиционирования оптического зонда для исследования внутренних поверхностей полых железобетонных конструкций / А. А. Кузнецов, А. С. Брюхова, Ю. В. Демин. –

DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-3-157-166 // Изв. вузов. Приборостроение. – 2019. – Т. 62, № 3. – С. 272 – 277.

Научные работы, опубликованные в изданиях индексируемых в международной реферативной базе данных Scopus

4. Video Control Application for Increasing of Materials Spectral Analysis Accuracy / A. A. Kuznetsov, A. S. Bryukhova. – DOI:10.4028 / www.scientific.net / SSP.284.1373 // Solid State Phenomena. – 2018. – Vol. 284. – P. 1373-1379 (date accessed: October 2018).

Научные работы, опубликованные в других изданиях:

5. Применение видеоконтроля для повышения точности спектрального анализа материалов / А. А. Кузнецов, А. С. Брюхова, А. С. Голубков, Д. В. Муравьев // «Динамика систем, механизмов и машин» : материалы XI Международной IEEE научно-технической конференции (Омск, 14-16 ноября 2017 г.) / ОмГТУ [и др.]. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2017. – Т.5 №2. – С. 140-144.

DOI: 10.25206/2310-9793-2017-5-2-140-144. 2017.

6. Брюхова, А.С. Система позиционирования оптического зонда диагностирования внутренних поверхностей полых железобетонных конструкций (тезисы докладов) / А. А. Кузнецов, А. С. Брюхова // «Оптика кристаллов и наноструктур (ОКиН)» : материалы II всеросс. науч. конф (Хабаровск, 22 мая 2018 г.) / ДвГУПС. – Хабаровск, 2018. – С. 52–53.

7. Исследование процесса коррозии на поверхности железобетонных изделий / А. А. Кузнецов, А. С. Брюхова, К. И. Фомиченко // «Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте» : материалы III всероссийской научно-технической конференции (Омск, 18 октября 2018 г.) / ОмГУПС. – Омск, 2018. – С. 14-21.

8. Испытание образцов сравнения для определения продуктов коррозии на поверхности железобетонных изделий (тезисы докладов) / А. А. Кузнецов, А. С. Брюхова, Н. В. Волкова // «Научные проблемы реализации транспортных проектов в Сибири и на Дальнем Востоке». Политранспортные системы : материалы X Международной научно-технической конференции (Новосибирск, 15–16 ноября 2018 г.) / СГУПС. – Новосибирск, 2018. – С. 267

9. Corrosion diagnostics technology improvement of reinforced concrete supports of the railways catenary system / A. A. Kuznetsov, A. S. Bryukhova A. A. Zaprudskiy, K. I. Fomichenko // «Метрология и метрологическое обеспечение 2018» : XXVIII

Международный научный симпозиум (Созополь, Болгария, 10 – 14 сентября 2018 г.) / ТУ – София. – Созополь, Болгария, 2018. – Р. 169 – 177.

10. Брюхова, А. С. Моделирование процесса развития коррозии полых железобетонных конструкций в агрессивных средах (тезисы доклада) / А. С. Брюхова, А. А. Кузнецов // «Приборы и методы неразрушающего контроля качества изделий и конструкций из композиционных и неоднородных материалов НККМ-2018»: материалы научн. техн. конф.(С.-Петербург, 11–13 декабря 2018 г.) / РОНКТД. ИТМО. – С.- Петербург, 2018. – С. 61.

11. Применение методов планирования эксперимента при исследовании процесса коррозии железобетонных конструкций / А. А. Кузнецов А. С. Брюхова, Н. В. Волкова // «Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте» : материалы научной конференции (Омск, 08 февраля 2019 г.) / ОмГУПС. – Омск, 2019. – С. 24 – 32.

Типография ОмГУПС. 2020. Тираж 100 экз. Заказ 359
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35