

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научно-исследовательской
деятельности

кандидат технических наук, доцент
Евгений Анатольевич Вдовин



11.02.2026 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский государственный архитектурно-строительный университет» на диссертацию Грязнова Сергея Юрьевича «Разработка методики оценки остаточного ресурса армированных бетонных балок, подверженных воздействию жидких агрессивных сред», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки)

Актуальность темы исследования

Железобетонные изгибаемые элементы составляют основу несущих систем зданий и сооружений различного назначения, в том числе объектов промышленной, транспортной и инженерной инфраструктуры. Значительная часть таких конструкций эксплуатируется в условиях воздействия жидких агрессивных сред, что обуславливает ускоренное развитие коррозионных и деформационных процессов, деградацию физико-механических свойств бетона и арматуры, снижение несущей способности и эксплуатационной надежности.

В условиях длительной эксплуатации особую актуальность приобретает задача количественной оценки остаточного ресурса, позволяющая принимать обоснованные решения о возможности дальнейшего использования конструкций, необходимости их ремонта, усиления либо замены. При этом действующие нормативные документы и большинство расчетных методик ориентированы преимущественно на проверку предельных состояний на стадии проектирования и в ограниченной степени отражают кинетику деградации материалов при длительном воздействии агрессивных сред.

Анализ отечественных и зарубежных исследований показывает, что существующие модели часто либо требуют труднореализуемого набора исходных данных, либо имеют высокую степень обобщенности и не обеспечивают комплексного учета изменения деформационных характеристик бетона и работы элемента «в целом».

В этой связи представленная в диссертационной работе Грязнова С.Ю. разработка методики оценки остаточного ресурса армированных бетонных балок, опирающейся на экспериментально подтвержденные закономерности изменения прочностных и деформационных характеристик бетона и включающей инструменты фрактального анализа диаграмм деформирования, представляет собой актуальную научно-техническую задачу.



Краткая характеристика работы и оценка ее содержания

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (234 источника) и трех приложений, включающих охранные документы на объекты интеллектуальной собственности и справку о внедрении результатов. Общий объем диссертации составляет 187 страниц машинописного текста.

Структура работы соответствует принятой для диссертаций на соискание ученой степени кандидата технических наук и обеспечивает последовательное раскрытие поставленной цели и задач исследования.

Во **введении** обоснована актуальность выбранной темы исследования, сформулированы цель и основные задачи работы, определены объект и предмет исследования, раскрыта научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены положения, выносимые на защиту, а также обоснованы методология и методы исследования, степень достоверности и обоснованности научных положений и выводов.

В **первой главе** выполнен аналитический обзор отечественных и зарубежных научных исследований, посвященных вопросам расчета, оценки надежности, долговечности и остаточного ресурса изгибаемых железобетонных конструкций, эксплуатируемых в условиях воздействия агрессивных сред. Рассмотрены существующие подходы и расчетные модели, используемые для оценки остаточного ресурса железобетонных элементов. Показано, что данные модели, как правило, не в полной мере учитывают изменение деформационных характеристик бетона и работу железобетонных элементов в условиях длительного воздействия жидких агрессивных сред, что подтверждает необходимость разработки новых методических подходов к решению рассматриваемой задачи.

Во **второй главе** изложены теоретические основы и расчетные предпосылки разрабатываемой методики оценки остаточного ресурса армированных бетонных балок с учетом воздействия жидких агрессивных сред. Обоснован выбор параметров, характеризующих изменение деформационных и прочностных свойств бетона, предложены аналитические зависимости, позволяющие учитывать деградацию характеристик материала во времени, а также сформулированы критерии оценки остаточного ресурса изгибаемых железобетонных элементов.

Экспериментальные исследования, направленные на изучение влияния жидких агрессивных сред на деформационные и прочностные характеристики бетона и работу армированных бетонных балок при изгибе, выполнены в рамках единой методической схемы и послужили основой для верификации предложенных расчетных моделей. Результаты экспериментов обработаны с применением современных методов анализа и представлены в графической и табличной форме, что подтверждает достоверность полученных выводов.

В **третьей главе** представлены результаты разработки и применения фрактальных методов анализа экспериментальных диаграмм деформирования бетона и армированных бетонных балок, полученных при воздействии жидких агрессивных сред. Обоснована возможность использования фрактальных

характеристик в качестве информативных параметров, отражающих изменение деформационного поведения бетона в процессе его деградации.

Разработана методика фрактального анализа диаграмм деформирования, позволяющая количественно оценивать влияние агрессивных сред на структуру и механические свойства бетона. Установлены закономерности изменения фрактальных характеристик в зависимости от условий воздействия, а полученные результаты использованы для обоснования критериев оценки остаточного ресурса и верификации предложенных расчетных зависимостей.

В четвертой главе изложены результаты разработки и применения фрактальных моделей деградации бетона в армированных бетонных конструкциях при воздействии жидких агрессивных сред. Предложенные модели основаны на использовании фрактальных характеристик, полученных в результате анализа экспериментальных диаграмм деформирования, и позволяют учитывать изменение деформационных и прочностных свойств бетона в процессе эксплуатации.

Разработанные фрактальные модели интегрированы в численные методы расчета изгибаемых армированных бетонных элементов, что обеспечивает учет деградации материала при определении напряженно-деформированного состояния и оценке остаточного ресурса конструкций. Выполнена численная реализация предложенного подхода.

В заключении сформулированы основные выводы по результатам выполненного исследования, отражающие решение поставленных в диссертационной работе задач, а также даны рекомендации по практическому использованию разработанной методики и направлениям дальнейших исследований.

Научная новизна

Научная новизна работы состоит в том, что соискатель не ограничился традиционным «прочностным» подходом к оценке ресурса, а построил методику, где деградация бетона в агрессивной среде описывается через фрактальные параметры, извлекаемые непосредственно из экспериментальных диаграмм деформирования, и далее встраивается в численный расчет НДС конструкции.

В частности, в качестве «носителя информации» о поврежденности материала принята фрактальная (мультифрактальная) размерность диаграммы « σ - ε », а изменение состояния во времени формализовано через фрактальную деградационную функцию $\varphi(t) = f(D_b(t))$ в диссертации показано, что (φ_t) может быть записана как $\varphi_t = 1/D_{b,t}$ и задает диапазон, связанный с ростом структурной неоднородности и ухудшением упруго-прочностных характеристик.

Это принципиально важно: фрактальный параметр здесь выступает не «декоративным» показателем формы кривой, а управляющим параметром деградации, через который затем корректируются расчетные характеристики бетона во времени и, в конечном счете, остаточный ресурс конструкции.

Еще один элемент новизны – это экспериментально подтвержденные корреляционные зависимости между стандартными упруго-прочностными

характеристиками бетона и фрактальными характеристиками неоднородности его структуры с учетом кинетики деградационных процессов. По сути, автор выстраивает связку от фрактальной характеристики диаграммы к изменению свойств бетона во времени, а от этого к оценке остаточного ресурса конструкции, что прямо зафиксировано в положениях, выносимых на защиту, и в разделе «Научная новизна».

Практическая реализация этой идеи показана на уровне методики расчета балок. Так деградация учитывается введением мультифрактальной функции в расчет предельного изгибающего момента M_{ult} , т.е. переходом к условию вида $M \leq M_{ult}(\varphi_m)$, где φ_m отражает деградацию структуры бетона во времени. Таким образом, новизна заключается именно в методическом переходе от качественного обсуждения повреждаемости к количественной ресурсной оценке, основанной на фрактальных моделях деградации и их корреляционной связи с расчетными свойствами материала.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, подтверждается применением апробированных методов и методик исследования физико-механического поведения бетона и железобетонных элементов, использованием действующей нормативной базы, выполнением комплекса экспериментальных испытаний балок и образцов бетона (в том числе после длительного воздействия жидкой агрессивной среды), а также корректной статистической обработкой и регрессионным анализом полученных данных. Достоверность результатов обеспечивается сопоставлением расчетных зависимостей и алгоритмов фрактального анализа с экспериментальными диаграммами деформирования и показателями прочности/деформативности, а работоспособность предложенного подхода подтверждена верификацией на фактических результатах испытаний и устойчивостью аппроксимации при обработке массивов экспериментальных данных.

Личное участие автора в получении результатов

Личное участие автора в получении результатов диссертационной работы является определяющим. Диссертант являлся руководителем и непосредственным исполнителем научно-исследовательских работ, выполнявшихся при поддержке гранта Фонда содействия инновациям по программе «УМНИК», в рамках которого были разработаны и апробированы основные элементы методики оценки остаточного ресурса армированных бетонных балок в условиях воздействия жидких агрессивных сред. Автором самостоятельно выполнены постановка цели и задач исследования, формирование экспериментальной программы, проведение испытаний образцов и балок, обработка и интерпретация экспериментальных диаграмм деформирования.

Результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы, оформлены в виде объектов интеллектуальной собственности, что подтверждает

личный вклад соискателя и практическую направленность исследования: получен патент Российской Федерации на способ определения фрактальной размерности экспериментальных диаграмм деформирования бетона, а также зарегистрированы программы для ЭВМ, реализующие разработанные алгоритмы обработки данных и расчета показателей деградации и остаточного ресурса.

Основные положения, выводы и рекомендации диссертации отражены в опубликованных научных работах и докладах на научно-практических конференциях, что свидетельствует о полноте апробации и авторском характере полученных результатов.

Значимость полученных автором диссертации результатов для развития науки

Значимость полученных автором диссертации результатов для развития науки заключается в расширении методологии исследования процессов деградации и ресурсного прогнозирования железобетонных конструкций, эксплуатируемых в жидких агрессивных средах, за счет использования фрактальных характеристик диаграмм деформирования как количественных показателей повреждаемости материала. Установленные корреляционные связи между фрактальными параметрами и упруго-прочностными характеристиками бетона развивают научные представления о взаимосвязи структурной неоднородности и физической нелинейности бетона во времени и создают основу для дальнейшего совершенствования расчетных моделей. Важным подтверждением научной состоятельности полученных результатов является их экспериментальная проверка и внедрение в профильной организации, где разработанная методика была апробирована при анализе экспериментальных данных и оценке состояния бетонных элементов, что обеспечивает связь теоретических выводов с реальной инженерной практикой и повышает научную ценность выполненного исследования.

Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов, приведенных в диссертации

Предложенная автором методика может быть использована при выполнении работ по определению технического состояния железобетонных изгибаемых элементов, в частности, балок, подверженных воздействию жидких агрессивных сред. В первую очередь это относится к конструкциям и сооружениям объектов водоснабжения и водоотведения, очистным и гидротехническим сооружениям, а также зданиям и технологическим объектам химической, пищевой и иных отраслей, где присутствуют растворы, способные вызывать деградацию бетона и снижение эксплуатационной надежности.

Полученные зависимости и предложенные подходы к обработке экспериментальных диаграмм деформирования бетона могут быть рекомендованы проектным организациям для уточнения расчетных моделей материалов при поверочных расчетах, обследованиях, разработке мероприятий по усилению и ремонту, а также при обосновании инженерных решений по продлению срока службы.

В научной и образовательной практике результаты диссертации могут быть использованы при разработке и актуализации методик экспериментальных исследований бетона и железобетона, при создании учебно-методических материалов по дисциплинам строительного профиля.

Перспективным направлением является формирование цифровых баз данных и внедрение программных средств их анализа, а также интеграция предложенных зависимостей в цифровые модели конструкций (в перспективе – в цифровые двойники) на базе разработанных автором программных средств и формируемых баз экспериментальных данных конструкций для задач долговременного мониторинга и прогнозирования ресурса.

Представляется целесообразным продолжить научные исследования в направлении разработки фрактальной деформационной модели железобетонных конструкций, обеспечивающей более полное описание нелинейного и деградационного поведения материалов и элементов при длительном воздействии агрессивных сред. Перспективным является расширение экспериментальной и расчетной базы с последующим применением методов машинного обучения и интеллектуального анализа данных для обработки массивов результатов испытаний, выявления устойчивых закономерностей, идентификации параметров моделей, построения прогностических зависимостей остаточного ресурса и разработки рекомендаций по повышению надежности и долговечности железобетонных конструкций, тем более что у автора диссертации уже сформирован определенный научно-методический задел и получены предварительные результаты, подтверждающие применимость указанных подходов к анализу больших массивов экспериментальных данных.

Следует отметить, что запатентованные технические решения, а также созданные в рамках исследования программные продукты и базы данных могут быть использованы в качестве технологического задела для формирования малой инновационной (технологической) компании, ориентированной на практическое внедрение разработанных методов. Такая организация способна обеспечить тиражирование и прикладную адаптацию предложенного инструментария для задач инженерной диагностики, мониторинга и прогнозирования остаточного ресурса железобетонных конструкций в агрессивных средах, включая разработку специализированного программного обеспечения, выполнение расчетно-экспертных работ, сопровождение проектов обследования и ремонта, а также оказание научно-технических услуг предприятиям строительной и промышленной сферы.

Замечания по диссертационной работе

1. Выбор и обоснование числа исключаемых начальных масштабов

В разделе, посвященном определению фрактальной размерности диаграмм деформирования методом покрытия сеткой, автор указывает на необходимость исключения начальных масштабных уровней из-за влияния дискретности экспериментальных данных (стр. 78-81). Вместе с тем критерий выбора числа исключаемых уровней фактически сводится к максимизации коэффициента детерминации R^2 , что носит преимущественно статистический характер. Было бы

целесообразно более подробно обсудить физические предпосылки такого выбора, а также устойчивость параметра при изменении частоты регистрации данных.

2. Округление значений фрактальной размерности

В подразделе, посвященном мультифрактальному анализу, указано, что в ряде случаев расчетная фрактальная размерность принимает значения менее единицы, которые далее округляются до $D_{b,f} = 1$ для сохранения диапазона граничных условий о топологической размерности объектов на плоскости (стр. 82-88). Данный прием представляется методически допустимым, однако в работе недостаточно подробно раскрыто, какое влияние такое округление оказывает на деградационную функцию и итоговые ресурсные показатели, особенно на начальных стадиях разрушения.

3. Границы применимости методики по видам воздействий

Экспериментальная часть диссертации выполнена преимущественно для условий воздействия 20%-го раствора NaCl и отдельных химически агрессивных сред (стр. 41). При этом в выводах методика формулируется достаточно обобщенно. Было бы полезно более четко обозначить границы применимости предложенного подхода при иных концентрациях сред, а также при сочетании агрессивного воздействия с циклическим нагружением или температурно-влажностными воздействиями.

4. Использование данных неразрушающего контроля в методике

В диссертации приведены результаты ультразвукового и склерометрического контроля, однако их роль в итоговой методике оценки остаточного ресурса носит преимущественно иллюстративный характер (стр. 44, 45, 52, 53). Представляется перспективным более четко обозначить, каким образом данные НК могут быть формализованы и использованы в качестве входных параметров методики при обследовании существующих сооружений без извлечения кернов.

5. Масштабируемость методики при изменении геометрии и армирования

Экспериментальные исследования выполнены для балок с конкретными геометрическими параметрами и типом армирования (стр. 41-42). При этом методика позиционируется как универсальная для изгибаемых элементов. Было бы целесообразно более четко обозначить, какие элементы методики инвариантны к изменению геометрии сечения и армирования, а какие требуют дополнительной калибровки или экспериментального уточнения.

Указанные замечания носят уточняющий и дискуссионный характер, не затрагивают основных научных положений диссертации и не снижают общей положительной оценки выполненной работы.

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней

Диссертационная работа Грязнова Сергея Юрьевича «Разработка методики оценки остаточного ресурса армированных бетонных балок, подверженных воздействию жидких агрессивных сред» является завершенной научно-квалификационной работой, в которой на основе выполненных теоретических и экспериментальных исследований решена актуальная научно-техническая задача

разработки физически обоснованной методики оценки остаточного ресурса конструкций, подверженных агрессивному влиянию условий эксплуатации, имеющая значение для развития теории и практики оценки надежности и долговечности железобетонных конструкций.

Диссертация соответствует требованиям пп. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842 (ред. от 16.10.2024), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Грязнов Сергей Юрьевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки).

Диссертация, автореферат и отзыв на диссертацию рассмотрены и одобрены на расширенном заседании кафедры «Железобетонные и каменные конструкции» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский государственный архитектурно-строительный университет», протокол № 9 от 26.02.2026 г.

Присутствовало на расширенном заседании 17 человек, из них 3 доктора технических наук и 1 доктор физико-математических наук, 10 кандидатов технических наук. Результаты голосования: за – 17 человек, против – нет, воздержавшиеся – нет.

Председатель расширенного заседания кафедры
«Железобетонные и каменные конструкции»,
заведующий кафедрой
«Железобетонные и каменные конструкции»,
доктор технических наук по специальности 05.23.01 (2.1.1)
«Строительные конструкции, здания и сооружения», доцент

Мирсаяпов Илшат Талгатович

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный архитектурно-строительный университет» (Казанский государственный архитектурно-строительный университет; КазГАСУ)
Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Почтовый адрес: 420043, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1
тел.: +7 (843) 510-46-01; +7 (843) 238-79-72
E-mail: info@kgasu.ru
Веб-сайт: <https://kgasu.ru>



С отпуском ведущей организации ознакомлен 12.03.2026