

На правах рукописи



Грязнов Сергей Юрьевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА
АРМИРОВАННЫХ БЕТОННЫХ БАЛОК, ПОДВЕРЖЕННЫХ
ВОЗДЕЙСТВИЮ ЖИДКИХ АГРЕССИВНЫХ СРЕД**

2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пенза 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Селяев Владимир Павлович

Официальные оппоненты: **Римшин Владимир Иванович**
доктор технических наук, профессор,
ФГБУ «Научно-исследовательский институт
строительной физики Российской академии
архитектуры и строительных наук»,
лаборатория ««Мониторинг жилищно-
коммунального хозяйства и радиационной
безопасности в строительстве», заведующий
лабораторией

Мурашкин Василий Геннадьевич
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Самарский государственный
технический университет», кафедра
«Железобетонные конструкции», доцент
кафедры

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Казанский государственный
архитектурно-строительный университет»,
г. Казань**

Защита диссертации состоится 2 апреля 2026 года в 13:00 на заседании диссертационного совета 24.2.356.01, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства», по адресу: 440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28, корпус 1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Пензенского государственного университета архитектуры и строительства и на сайте <http://dissovet.pguas.ru/index.php/contact-us/24-2-356-01%20/%20125-gryaznov-sergej-yurevich>.

Автореферат разослан 2 февраля 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Снежкина Ольга Викторовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Проблема обеспечения надежности и долговечности железобетонных конструкций остается одной из наиболее острых в строительной науке и практике. Массовое старение сооружений, построенных более полувека назад, требует объективных методов диагностики и прогнозирования их остаточного ресурса. Несмотря на многочисленные исследования, отсутствует единый подход, позволяющий учесть эволюцию деградации от микроповреждений в структуре цементного камня до образования макротрещин. Современные возможности получения высокоточных экспериментальных диаграмм деформирования и применение аппарата фрактальной геометрии создают предпосылки для разработки комплексной методологии анализа деградации бетона. Реализация такого подхода позволит сформировать надежную научную основу для продления безопасной эксплуатации железобетонных конструкций.

Степень разработанности темы исследования

Вопросам изучения остаточного ресурса строительных конструкций посвящено большое количество работ Н.С. Стрелецкого, А.Р. Ржаницына, В.В. Болотина, Л.М. Пухонто, Ю.В. Зайцева В.И. Соломатова, В.П. Селяева, В.В. Петрова, А.Ф. Полака, В.Ф. Степановой, В.Р. Фаликмана, К. Tuutti, M. Alexander, F.H. Wittmann, L. Bertolini, F. Jiang, U.M. Angst, R.E. Melchers, E. Sistonen, M.G. Stewart, D.V. Rosowsky, F. Biondini и многих других ученых. Важной отличительной особенностью перечисленных работ является учет в моделях деградации структуры материалов и конструкций фактора времени.

Разработкой методов фрактального анализа строительных материалов и конструкций занимались: В. Mandelbrot, E. Feder, F. Borodich, A. Carpinteri, H. Takayasu, В.К. Балханов, В.П. Селяев, Т.А. Низина и другие. Применение основ фрактальной геометрии позволили рассмотреть процессы разрушения структуры материалов на элементарном уровне; получить описание детерминированных процессов, применив строгие математические законы.

Цель исследования – разработка методики оценки остаточного ресурса армированных бетонных конструкций, работающих в условиях совместного воздействия механических нагрузок и жидких агрессивных сред, на основе фрактальных моделей деградации структуры бетона.

В соответствии с поставленной целью решались следующие **задачи**:

1. Выполнить анализ современного состояния исследований в области надежности, долговечности и остаточного ресурса армированных бетонных конструкций, работающих в условиях совместного воздействия механических нагрузок и жидких агрессивных сред.

2. Провести лабораторные испытания армированных бетонных балок в условиях воздействия механических нагрузок и жидких агрессивных сред. Определить упруго-прочностные свойства бетона контрольных образцов; на их основе провести сравнительный анализ деформационных моделей сжатого бетона. Подобрать функцию аппроксимации нелинейных экспериментальных

диаграмм деформирования, соответствующую условиям расчета конструкций численными методами.

3. Разработать алгоритм оценки структурной неоднородности бетона армированных конструкций, основанный на методе определения фрактальной размерности диаграмм деформирования контрольных образцов. Установить корреляции между упруго-прочностными свойствами бетона и фрактальными характеристиками неоднородности его структуры.

4. Разработать фрактальные модели деградации бетона армированных конструкций, учитывающие воздействие жидких агрессивных сред, а также разработать на их основе методику оценки остаточного ресурса.

Объект исследования – армированные бетонные балки, подверженные совместному воздействию механических нагрузок и жидких агрессивных сред.

Предмет исследования – закономерности деградации структуры бетона и оценка остаточного ресурса армированных бетонных балок при совместном воздействии механических нагрузок и жидких агрессивных сред.

Научная новизна

1. Разработана методика оценки остаточного ресурса армированных бетонных конструкций, работающих в условиях совместного воздействия механических нагрузок и жидких агрессивных сред, на основе фрактальных моделей деградации структуры бетона.

2. Экспериментально обоснованы корреляционные зависимости между упруго-прочностными свойствами бетона и фрактальными характеристиками неоднородности его структуры, необходимые для оценки остаточного ресурса конструкций, учитывающие кинетику деградационных процессов.

3. Предложен алгоритм оценки структурной неоднородности бетона армированных конструкций, основанный на методе определения фрактальной размерности диаграмм деформирования контрольных образцов материала, учитывающий негативное влияние дискретности экспериментальных данных на малых масштабных уровнях.

4. Экспериментально обоснована нелинейная деформационная модель сжатого бетона, представленная в виде модифицированной полиномиальной функции, позволяющая повысить точность расчетов конструкций численными методами, за счет достоверной аппроксимации экспериментальных диаграмм деформирования и получения осесимметричных эпюр секущих и касательных модулей деформации бетона.

Теоретическая и практическая значимость

Теоретическая значимость результатов работы заключается в развитии фундаментальных представлений о механизмах деградации структуры бетона армированных конструкций при воздействии на них жидких агрессивных сред. Была обоснована релевантность фрактальных характеристик диаграмм деформирования для количественной оценки структурной неоднородности бетона и установлены закономерности ее изменения во времени. Выявленные корреляционные зависимости между фрактальной размерностью и упруго-

прочностными свойствами исследуемых материалов позволили разработать методику оценки остаточного ресурса армированных бетонных конструкций.

Практическая значимость результатов работы заключается в создании инструментария для оценки остаточного ресурса армированных бетонных конструкций, подверженных совместному воздействию жидких агрессивных сред, а также нелинейной деформационной модели, повышающей точность их численного расчета. Результаты применимы в инженерной диагностике и для актуализации нормативных документов.

Методология и методы исследования

При проведении исследований в диссертационной работе применяли взаимодополняющие методы научного познания. Эксперимент заключался в проведении серии лабораторных испытаний бетонных образцов и балок со стеклокомпозитной арматурой, экспонируемых в жидких агрессивных средах. Результаты работы основаны на собственных экспериментах и научных публикациях, а также анализе научных публикаций, представленных в обзоре.

Сопоставление полученных результатов с известными литературными источниками позволило разработать предложения по использованию методов фрактального анализа для оценки остаточного ресурса исследуемых бетонных конструкций.

Положения, выносимые на защиту

1. Методика оценки остаточного ресурса армированных бетонных конструкций, работающих в условиях совместного воздействия механических нагрузок и жидких агрессивных сред, основанная на фрактальных моделях деградации структуры бетона.

2. Корреляционные зависимости между упруго-прочностными свойствами бетона и фрактальными характеристиками неоднородности его структуры, необходимые для оценки остаточного ресурса конструкций, учитывающие кинетику деградиационных процессов.

3. Алгоритм оценки неоднородности структуры бетона армированных конструкций, основанный на методе определения фрактальной размерности диаграмм деформирования контрольных образцов, учитывающий негативное влияние дискретности экспериментальных данных на малых масштабных уровнях.

4. Нелинейная модель деформации сжатого бетона, представленная в виде модифицированной полиномиальной функции, позволяющая повысить точность расчетов конструкций численными методами, за счет достоверной аппроксимации экспериментальных диаграмм деформирования и получения осесимметричных эпюр секущих и касательных модулей деформации бетона.

Апробация результатов

Результаты диссертационной работы обсуждались на:

1. Международной научно-технической конференции, посвященной памяти первого председателя научного совета РААСН «Механика разрушения бетона, железобетона и других строительных материалов», почетного члена РААСН, доктора технических наук, профессора Зайцева

Юрия Владимировича: «Долговечность, прочность и механика разрушения строительных материалов и конструкций» (г. Саранск, 2020 г.).

2. XXIV Научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов Национального исследовательского Мордовского государственного университета (г. Саранск, 2021 г.).

3. Всероссийской с международным участием научной конференции «L Огарёвские чтения», посвященной 90-летию ФГБОУ ВО «МГУ им. Н.П. Огарёва» (г. Саранск, 2021 г.).

4. Всероссийской с международным участием научной конференции «LII Огарёвские чтения» (г. Саранск, 2023 г.).

5. V Международной конференции «ЭРА IP: Интеллектуальная собственность в системе инновационно ориентированной экономики» (г. Москва, 2023 г.).

6. I Петербургском международном молодежном саммите техноброкеров, изобретателей и рационализаторов IpTech, приуроченном ко Дню российского предпринимательства (г. Санкт-Петербург, 2023 г.).

7. XXII Международной научно-технической конференции «Актуальные вопросы архитектуры и строительства», посвященной 105-летию со дня рождения В.А. Карташова (г. Саранск, 2024 г.).

8. II Международной научно-практической конференции «Качество жизни: архитектура, строительство, транспорт, образование» (г. Иваново, 2024 г.).

9. XXVII научно-практической конференции молодых ученых МГУ им. Н.П. Огарёва (г. Саранск, 2024 г.).

10. Международной научно-технической конференции «Долговечность строительных материалов, изделий и конструкций», проводимой в рамках деятельности Научного Совета Российской Академии архитектуры и строительных наук «Механика разрушения бетона, железобетона и других строительных материалов» (г. Саранск, 2025 г.).

Реализация работы

Работа по теме диссертационного исследования награждена дипломом победителя конкурса по программе «УМНИК» Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (ФСИ), реализован грант объемом финансирования 500 тыс. руб.

Разработанная методика оценки остаточного ресурса армированных бетонных конструкций в настоящее время проходит научно-практическую проверку в ООО «МОРДОВСТРОЙТЕСТ», г. Саранск.

Степень достоверности результатов исследования

Достоверность результатов и обоснованность выводов обеспечивается использованием поверенных измерительных приборов, сертифицированного испытательного оборудования и прикладных программных комплексов, а также сходимостью в допустимых пределах результатов экспериментальных исследований и прогнозируемых значений разработанными моделями.

Личный вклад автора

Автор принимал личное участие в разработке предложений и решении всех поставленных задач в рамках диссертационной работы.

Соответствие паспорту специальности

Диссертационная работа соответствует пункту 3 паспорта научной специальности 2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки): «Развитие теории и методов оценки напряженного состояния, живучести, риска, надежности, остаточного ресурса и сроков службы строительных конструкций, зданий и сооружений, в том числе при чрезвычайных ситуациях, особых и запроектных воздействиях, обоснование критериев приемлемого уровня безопасности».

Публикации

По теме диссертации опубликовано 13 работ, в том числе 9 научных работ, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук. Получено 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ. Техническая новизна решений подтверждена патентом РФ на изобретение.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из оглавления, введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 234 наименования и трех приложений. Изложена на 187 страницах машинописного текста, включает 20 таблиц, 59 рисунков. Три приложения изложены на 31 странице.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность выбранной темы, степень ее проработанности, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна, теоретическая, практическая значимость работы, а также положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** выполнен анализ существующих методик оценки остаточного ресурса армированных бетонных конструкций, работающих в условиях воздействия жидких агрессивных сред.

Армированный бетон, в частности, железобетон – является основным конструкционным материалом, применяемым в современном строительстве, мировой объем производства которого превышает 5 млрд. куб. м в год, лидируя в общей структуре производства строительной продукции.

Конструкции из армированного бетона широко используются при возведении как одноэтажных частных домов, так и уникальных общественных зданий и сооружений. Так, например, существующие в России объекты капитального строительства составляют более 60 % основных фондов, и не менее 65 % этих фондов – конструкции из железобетона, возведенные во второй половине прошлого века. Ключевым требованием к их безопасной эксплуатации является обеспечение надежности и долговечности на протяжении всего расчетного срока службы. Рассматриваемые проблемы не теряют своей актуальности на протяжении уже многих десятков лет, так как при ошибках проектирования или несвоевременном техническом обслуживании конструкции могут одномоментно перейти в предельное, а затем и аварийное состояние в течение очень короткого промежутка времени – в первые 5–10 лет эксплуатации.

Исторически методы оценки долговечности опирались на учет механических факторов и вероятностные подходы, позднее были развиты модели, учитывающие химико-физические процессы коррозии. Современные подходы систематизируются в три группы: детерминистические физико-химические модели (карбонизация, хлоридная и сульфатная коррозия), вероятностные методы (с использованием Монте-Карло и аналитических решений) и механохимические модели разрушения. Однако существующие модели часто игнорируют структурную неоднородность бетона и синергетическое воздействие факторов среды, что снижает точность прогнозирования.

Механика разрушения бетона – сложная область, изучающая процессы образования и развития трещин в гетерогенном материале, включающим цементный камень, заполнители, поры и дефекты разных масштабов. При внешнем нагружении внутри бетона формируется обширная сеть трещин и повреждений со сложной геометрией. Изучением механизмов разрушения структуры материалов занимались А.А. Гвоздев, О.Я. Берг, Н.И. Карпенко. Подобие структур на разных масштабных уровнях строения композитов рассматривалось в работах В.И. Соломатова, В.П. Селяева, Ю.В. Зайцева, М.А. Садовского. Структура композиционных материалов в основе своей

имеет иерархическое строение по принципу «структура в структуре» или «блок в блоке»; она фрактальна, так как состоит на разных масштабных уровнях из частей, которые подобны целому. Фрактальные параметры связаны с физическими характеристиками разрушения и позволяют прогнозировать прочность и долговечность конструкций. Благодаря современным методам (компьютерная томография, цифровая обработка изображений) можно более детально исследовать фрактальную природу разрушения и применять ее результаты на практике.

Во второй главе исследована работа армированных бетонных балок в условиях воздействия жидких агрессивных сред. Изготовили 12 балок из бетона с пропорциями по объему в м^3 – 10:11:24 (Ц:П:Щ), армированных по нижней грани двумя стержнями стеклокомпозитной арматуры (АСК) диаметром 8 мм. Длина балок – 1 м, ширина поперечного сечения – 0,05 м, высота поперечного сечения – 0,1 м, толщина защитного слоя бетона – 0,025 м. Балки № 08-12 непрерывно экспонировали в среде 20%-го раствора NaCl на протяжении 443 суток при постоянной температуре окружающей среды (20 ± 2) °С. Балки № 01-07 – контрольные – находились в нормальных условиях эксплуатации.

Затем балки испытывали на изгиб сосредоточенной в середине пролета нагрузкой, которую прикладывали поступательно по 0,42 кН на каждом шаге до полного разрушения (рисунок 1).

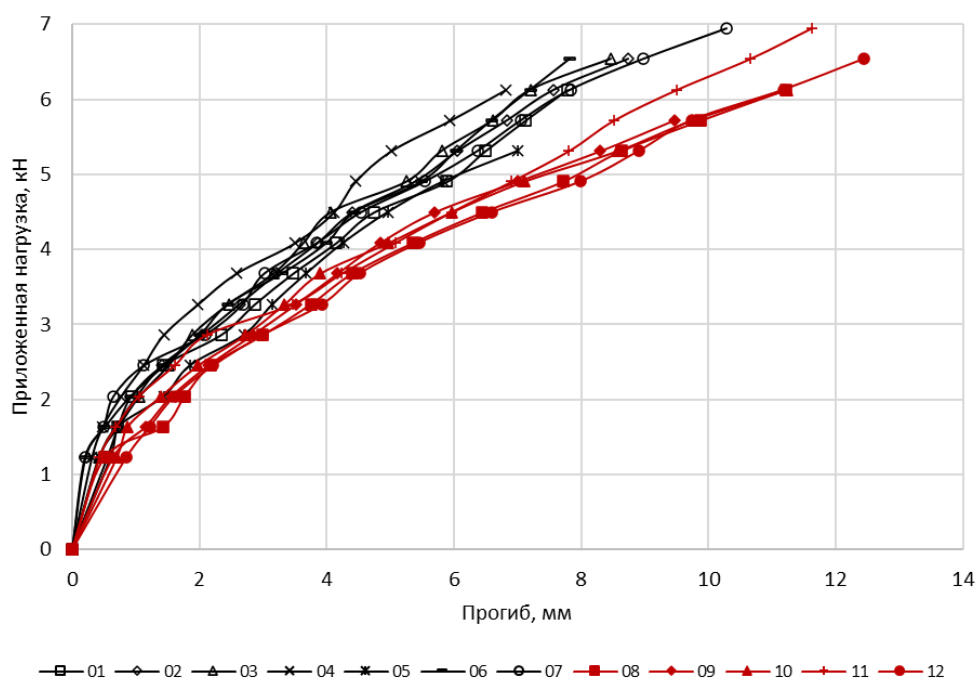


Рисунок 1 – Зависимости изменения прогибов балок в середине пролета от величины нагрузки

Несущая способность экспонированных балок снизилась на 50 % по сравнению с контрольными образцами, а деформативность увеличилась, что проявилось как в абсолютных значениях прогибов, так и в более быстром наступлении разрушения при меньших нагрузках.

Для получения экспериментальных диаграмм деформирования бетона, описывающих процесс деформирования и разрушения структуры материала под нагрузкой, были проведены испытания контрольных образцов-цилиндров. Из каждой балки было высверлено по пять образцов-цилиндров диаметром 60 мм и высотой, равной ширине балки. Испытания образцов на сжатие выполняли с применением программно-аппаратного комплекса Wille Geotechnik (модель 13-PD/401), данные записывали в автоматическом режиме с интервалом 0,1 с при скорости нагружения 0,5 мм/мин, построили диаграммы (рисунок 2).

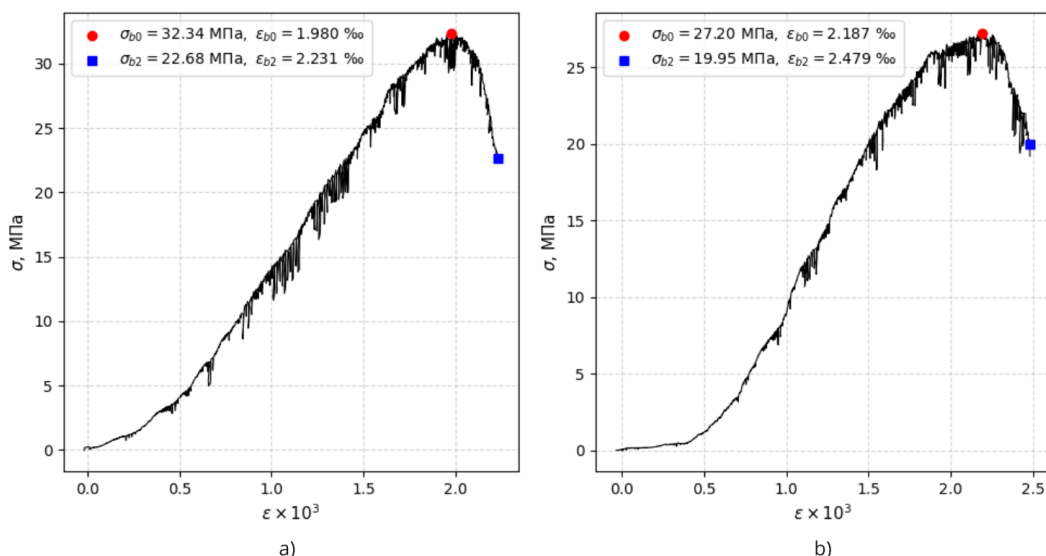


Рисунок 2 – Экспериментальные диаграммы деформирования образцов-цилиндров:
а – № 03; б – № 06

Представленные диаграммы отражают действительную работу бетона под нагрузкой. Для применения в расчетных моделях их приводили к нормативному виду.

Алгоритм реализовывается следующим образом:

1. Экспериментальная диаграмма деформирования аппроксимируется функцией $\sigma_i = a\varepsilon_i^5 + b\varepsilon_i^4 + c\varepsilon_i^3 + d\varepsilon_i^2 + e\varepsilon_i$, коэффициенты при неизвестных определяются методом наименьших квадратов.

2. Определяются точки перегиба функции (IP_i) (рисунок 3, а), как корни 2-й производной полинома: $\sigma_i'' = 20a\varepsilon_i^3 + 12b\varepsilon_i^2 + 6c\varepsilon_i + 2d$. Точки перегиба имеют важное значение при анализе диаграмм напряжение-деформация, так как они указывают на переход от упругой к пластической деформации.

3. Определяются точки экстремума полинома: Max – максимального напряжения (σ_{max}); End – предельных деформаций (ε_{end}).

4. Через точку перегиба (IP_1) проводится касательная к графику функции.

Уравнение касательной имеет вид:

$$f_2(\varepsilon_i) = f_1(\varepsilon_{IP_1}) + f_1'(\varepsilon_{IP_1})(\varepsilon_i - \varepsilon_{IP_1}), \quad (1)$$

где $f_1(\varepsilon_{IP_1})$ – значение функции полинома от ε_{IP_1} ;

$f'_1(\varepsilon_{IP_1})$ – значение производной функции полинома от ε_{IP_1} .

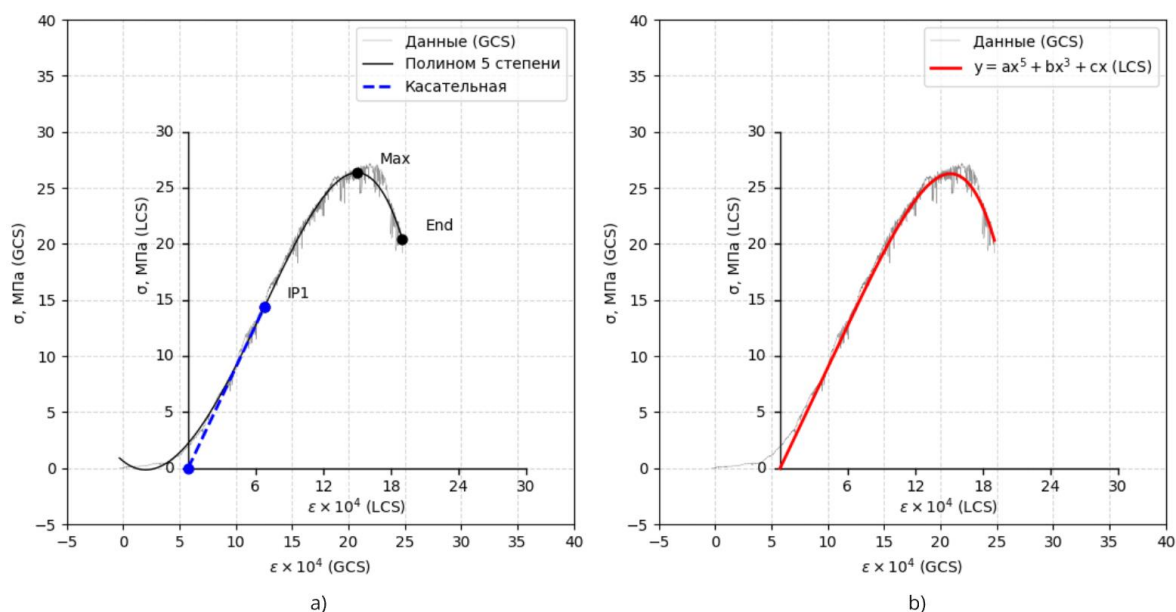


Рисунок 3 – Приведение экспериментальной диаграммы деформирования образца цилиндра № 06 к нормативному виду: *a* – введение локальной системы координат (LCS); *b* – аппроксимация нормированной диаграммы комбинированной степенной функцией

Из формулы (1) следует, что $f_2(\varepsilon_i) = 0$ при $\varepsilon_i = \varepsilon_{LCS}$, где ε_{LCS} – точка пересечения касательной оси абсцисс (начало локальной системы координат, LCS), тогда:

$$\varepsilon_{LCS} = \left(f'_1(\varepsilon_{IP_1})\varepsilon_{IP_1} - f_1(\varepsilon_{IP_1}) \right) \cdot \left(f'_1(\varepsilon_{IP_1}) \right)^{-1}. \quad (2)$$

5. После нахождения величины ε_{LCS} по формуле (2) вводится локальная система координат, с началом в точке с координатами $(\varepsilon_{LCS}; 0)$. Диаграмма деформирования получает необходимое смещение. Начальный модуль деформации материала определяется, как угловой коэффициент касательной $\text{tg}(\alpha) = k = E_b$.

6. Аппроксимируется скорректированная диаграмма комбинированной степенной функцией $\sigma_i = a\varepsilon_i^5 + b\varepsilon_i^3 + c\varepsilon_i$ (рисунок 3, *b*), а затем определяются коэффициенты при неизвестных методом наименьших квадратов.

В третьей главе представлены результаты исследования на основе мультифрактального анализа экспериментальных диаграмм деформирования бетонов.

Метод определения фрактальной размерности основан на применении метода покрытия двумерных объектов сеткой (*BCM, box counting method*). Он включает следующие основные этапы:

1. Контрольный образец стандартной формы и размеров подготавливается к испытанию, устанавливается в испытательную машину (пресс) с числовым программным управлением (например, Wille Geotechnik (модель 13-PD/401)). Нагружается непрерывно (до разрушения) с постоянной скоростью деформирования, установленной в пределе от 0,001 до 0,01 мм/с. Фиксируются сжимающие напряжения (σ , МПа) и относительные

деформаций (ε) с частотой, выбранной в переделе от 0,01 до 0,1 с, построчно записываются данные для каждого шага (n) нагружения в табличном виде (рисунок 4, а).

n	σ , МПа	ε	n	$\tilde{\sigma}$, МПа	$\tilde{\varepsilon}$
1	0 (min)	0 (min)	1	0 (min)	0 (min)
...
1349	27.0949	0.002185	1349	0.9963	0.881404
1350	27.1960 (max)	0.002187	1350	1 (max)	0.882211
1351	27.1433	0.002190	1351	0.9981	0.883421
...
1527	19.9544	0.002477	1527	0.7337	0.999193
1528	19.5129	0.002478	1528	0.7175	0.999597
1529	19.1931	0.002479 (max)	1529	0.7057	1 (max)

а)

б)

Рисунок 4 – Экспериментальные данные (для образца-цилиндра № 06) сжимающих напряжений (σ) и относительных деформаций (ε), построчно записанные для каждого шага (n) нагружения: а – исходные значения; б – нормализованные значения

2. Выполняется нормализация экспериментальных данных (приведение значений величин (σ) и (ε) к диапазону от 0 до 1) (рисунок 4, б) по формулам $\tilde{\sigma}_i = \sigma_i / \sigma_{b0}$ и $\tilde{\varepsilon}_i = \varepsilon_i / \varepsilon_{b2}$, которые затем умножаются на 1000, при этом выделяют целые части для преобразования в целочисленные индексы i и j , принадлежащие диапазону $[0, 1000]$. Затем диаграмма покрывается сеткой с квадратными ячейками размерностью $\delta(s)$, где s – масштабный уровень, получают квадратную матрицу плотности $A_{m \times n}^s$ при $m = n$. Матрица плотности – дискретное распределение данных в двумерном пространстве. Из условия если $\sigma_i = f(\varepsilon_i) \in a_{i,j}^s$, тогда $a_{i,j}^s = 1$, то есть, каждая ячейка матрицы показывает, количество экспериментальных точек (n), принадлежащих соответствующему сегменту пространства для масштабного уровня s . Например, для: $s = 1$ (рисунок 5, а); $s = 5$ (рисунок 5, б).

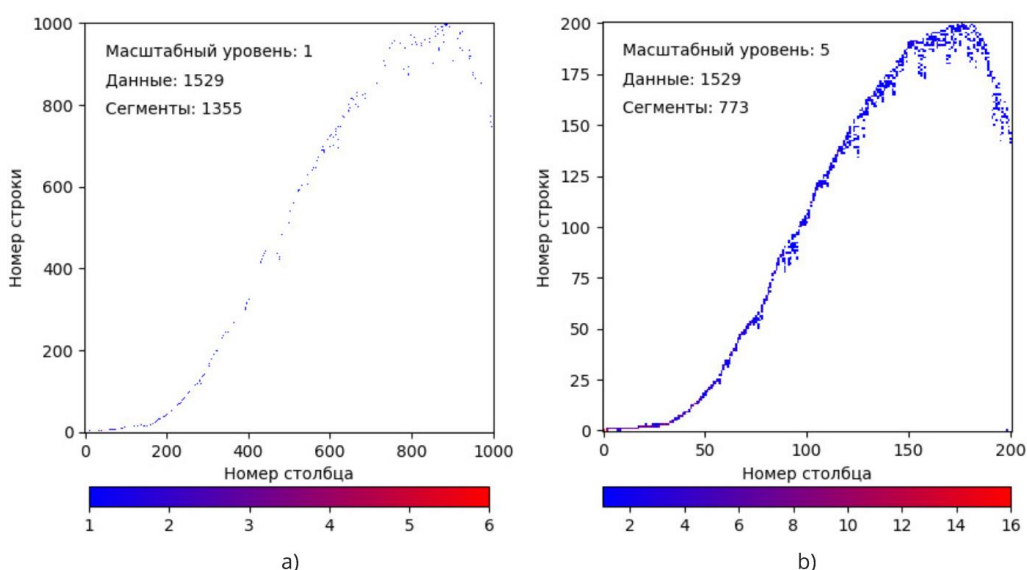


Рисунок 5 – Матрицы плотности данных (для образца-цилиндра № 06)

3. Определяется количество уникальных сегментов (*Segments*), как число N_s ненулевых значений элементов $a_{i,j}^s$ матрицы плотности $A_{m \times n}^s$. Строится график функции $N_s = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a_{i,j}^s = cs^{-D}$, при этом определяются значения N_s на каждом масштабном уровне $s = 1, 2 \dots 100$, где $m = n = (10^3 s^{-1} + 1)$ – размерность матрицы плотности $A_{m \times n}^s$; c – безразмерный коэффициент смещения, при условии $\forall c \in \mathbb{Q}$ (рисунок 6, а).

4. Логарифмируется функция $N_s = cs^{-D}$, а затем определяется величина фрактальной размерности D_a , как угловой коэффициент уравнения прямой $\log(N_s) = \log(cs^{-D}) = \log(c) - D \cdot \log(s)$ (рисунок 6, б).

5. Последовательно исключаются масштабные уровни, начиная с $s = 1$, при этом, для каждой регрессии вычисляется коэффициент детерминации по формуле $R^2 = 1 - (RSS/TSS)$, где RSS – сумма квадратов остатков, а TSS – общая сумма квадратов.

6. Выбирается такое значение s_k , при котором R^2 достигает максимума. Это обеспечивает наиболее линейную зависимость между $\log(N_s)$ и $\log(s)$, а следовательно, более точную величину фрактальной размерности D_b .

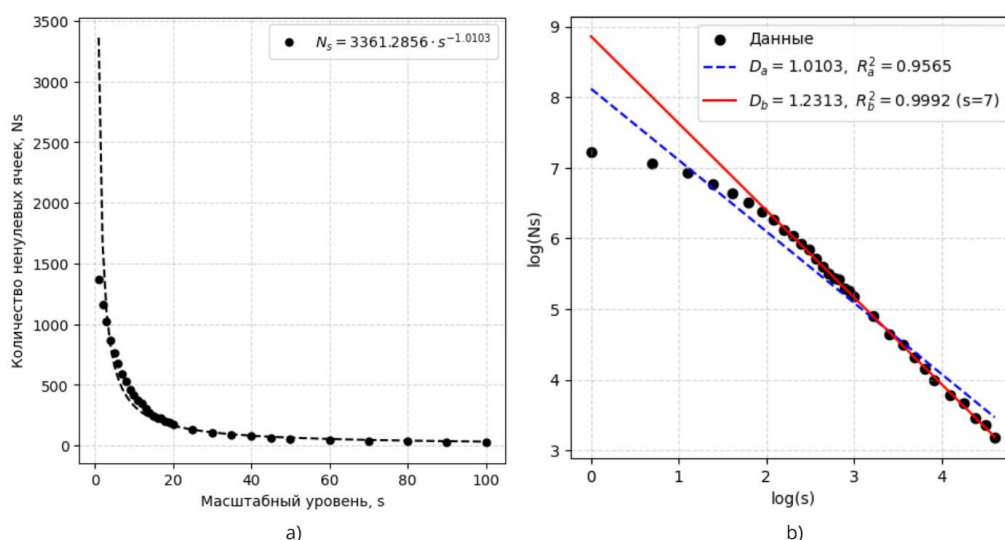


Рисунок 6 – Определение фрактальной размерности для образца-цилиндра № 06

После применения процедуры корректировки фрактальная размерность увеличилась для всех анализируемых диаграмм. Процент изменения (ΔD) варьируется от минимального значения 3,4887 % до максимального значения 36,3077 %. Среднее значение изменения составляет 16,6014 %. Это указывает на то, что исходные величины фрактальной размерности (D_a) были занижены из-за влияния шума на малых масштабах, а корректировка позволила получить более реалистичные значения фрактальной размерности. Среднее значение коэффициента детерминации для исходных данных (R_a^2) составило 0,9643, тогда как после корректировки (R_b^2) оно достигло высокого уровня 0,9990. Увеличение данного параметра подтверждает, что исключение шумных масштабов привело к более четкой линейной зависимости и, следовательно, к более надежной оценке фрактальной размерности.

Затем был выполнен мультифрактальный анализ диаграмм, основная идея которого заключается в разложении поведения сложного объекта на

набор статистических «режимов», каждый из которых характеризуется собственной регулярностью или неравномерностью, и оценивать, с какой интенсивностью каждый такой режим проявляется. Такой подход помогает глубже понять структуру процессов с переменными свойствами, когда классические методы, основанные на одной характерной масштабной размерности, дают слишком грубое приближение.

Для удобства анализа диаграмм предлагается делить их на равное количество фрагментов $f = 1, 2, \dots, 50$.

Результаты фрагментирования диаграммы для образца-цилиндра № 06 показаны на рисунке 7. Вертикальные границы фрагментов определяются из условия деления диаграммы на равные части, а горизонтальные границы (верх и низ фрагмента) из определения максимальных и минимальных значений (σ) сжимающих напряжений (соответственно), принадлежащих рассматриваемой области диаграммы.

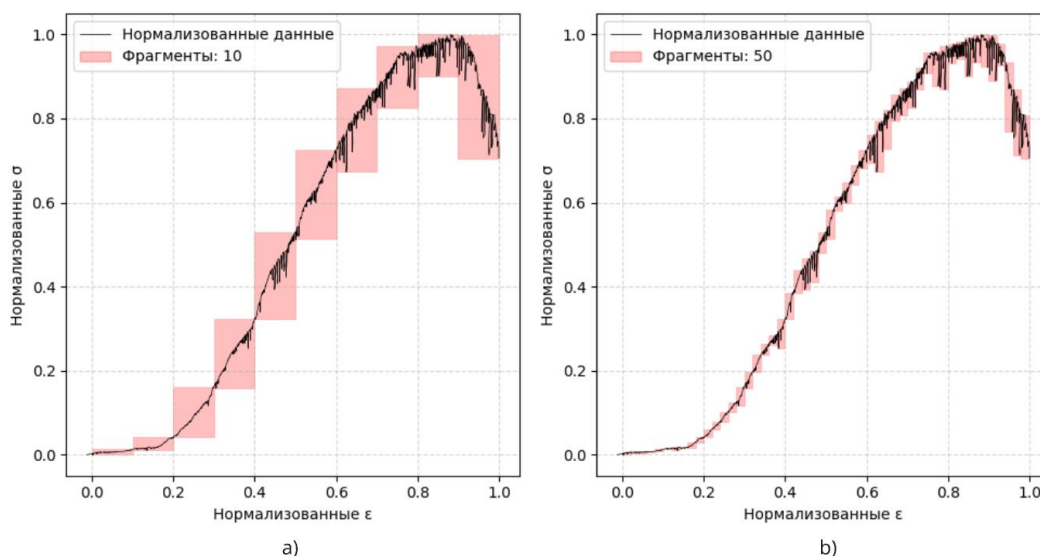


Рисунок 7 – Фрагментация диаграммы деформирования для образца-цилиндра № 06:
а – 10 фрагментов; б – 50 фрагментов

Таким образом, величина фрактальной размерности $D_{b,f}$, определенная на каждом фрагменте f , может стать своеобразным маркером, показывающим, что именно происходит с нагруженным материалом при различных условиях эксплуатации, если иметь достаточную базу значений таких маркеров.

Далее был выполнен расчет величины фрактальной размерности $D_{b,f}$ для каждого из 10 фрагментов, для всех 200 экспериментальных диаграмм деформирования, полученных в рамках диссертационной работы.

На основании представленных расчетов можно сделать следующие выводы. Более прочные и жесткие образцы имеют более гладкие диаграммы, тогда как у образцов с пониженной прочностью кривая более нерегулярна (большее значение D_b). Например, для тяжелого бетона без повреждений ($\sigma_{b0} \approx 50 \div 55$ МПа) – $D_b \approx 1,17 \div 1,36$, а для экспонированных образцов с низкой прочностью ($\sigma_{b0} \approx 25 \div 30$ МПа) – $D_b \approx 1,30 \div 1,46$.

Методика мультифрактального анализа экспериментальных диаграмм деформирования позволяет произвести количественную оценку изменения структурной неоднородности бетона, которая изменяется под действием агрессивных сред.

В четвертой главе представлены результаты моделирования работы армобетонных конструкций, подверженных воздействию агрессивных сред, с применением фрактальных и мультифрактальных деградационных функций.

Экспериментальное значение фрактальной деградационной функции в момент времени t может быть записано как (см. рисунки 8, а и 9, а):

$$\phi_t = 1/D_{b,t}, \quad (4)$$

где $D_{b,t}$ – фрактальная размерность экспериментальной диаграммы деформирования в момент времени t .

Исходя из того утверждения, что для двумерных объектов величина фрактальной размерности изменяется в пределах от 1 до 2, можно установить граничные условия для фрактальной деградационной функции: $0,5 \leq \phi_t \leq 1$. Откуда следует, что при значении $\phi_t \rightarrow 0,5$ происходит процесс увеличения структурной неоднородности материала – снижение его упруго-прочностных характеристик, вызванное, в том числе, воздействием жидких агрессивных сред.

Для более детального анализа изменения структурной неоднородности бетона во времени может быть применена мультифрактальная деградационная функция, экспериментальное значение которой в момент времени t записано как (см. рисунки 8, b и 9, b):

$$\phi_{m,t} = F^{-1} \cdot \sum_{f=1}^F (1/D_{b,f,t}), \quad (5)$$

где $D_{b,f,t}$ – фрактальная размерность -фрагмента фрагментированной диаграммы деформирования в момент времени t ;

F – фрагментация экспериментальной диаграммы деформирования.

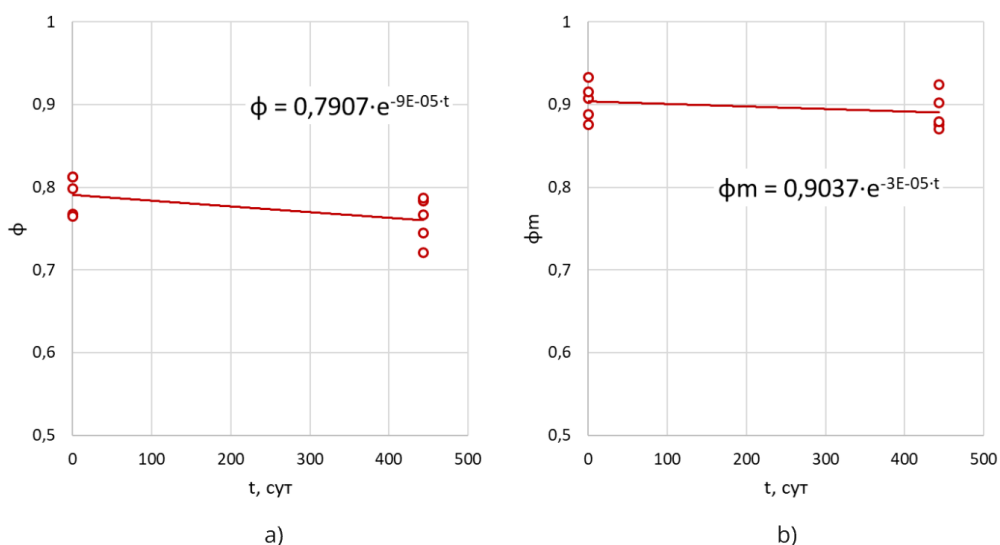


Рисунок 8 – Графики изменения во времени фрактальной (a) и мультифрактальной (b) деградационных функций при воздействии на конструкцию 20%-го раствора NaCl

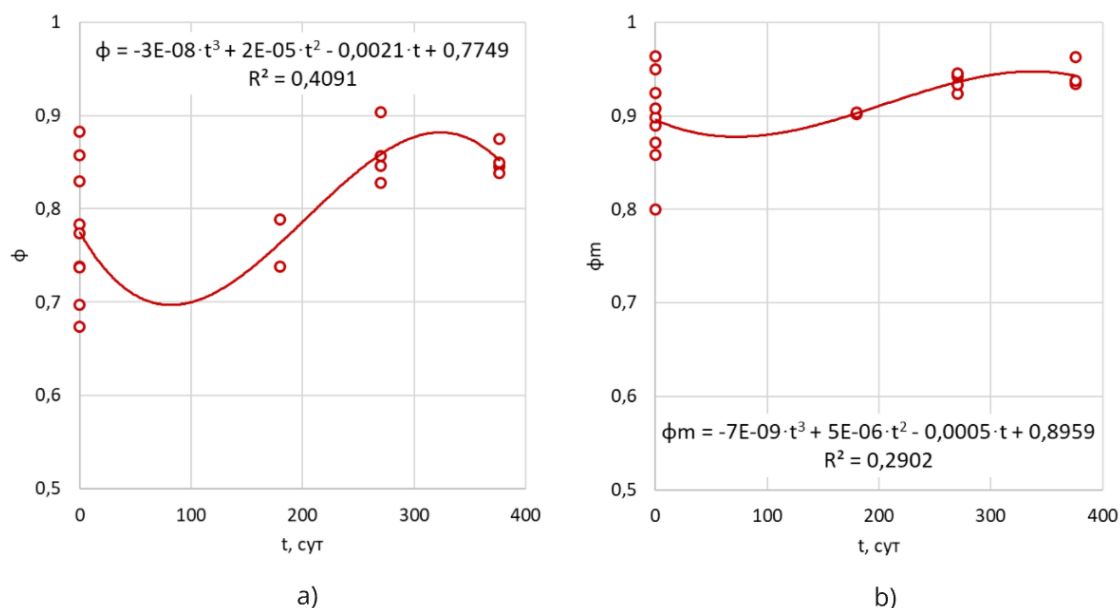


Рисунок 9 – Графики изменения во времени фрактальной (а) и мультифрактальной (b) деграционных функций при воздействии на материал конструкции 2,34%-го раствора H_2SO_4

Значения ϕ и ϕ_m (см. рисунки 8 и 9) позволяют определить функции $E_b(\phi)$, $E_b(\phi_m)$, $R_b(\phi)$, $R_b(\phi_m)$, $\sigma_{b0}(\phi)$, $\sigma_{b0}(\phi_m)$, $\varepsilon_{b0}(\phi)$, $\varepsilon_{b0}(\phi_m)$, $\sigma_{b2}(\phi)$, $\sigma_{b2}(\phi_m)$, $\varepsilon_{b2}(\phi)$, $\varepsilon_{b2}(\phi_m)$ вида $f(\phi) = \alpha_i e^{\beta_i \phi}$ и $f(\phi_m) = \mu_i e^{\omega_i \phi_m}$ (таблица 1), где α_i , β_i , μ_i , ω_i – коэффициенты интенсивности деградации.

Таблица 1 – Параметры фрактальных и мультифрактальных деграционных функций

i	f	α_i	β_i	μ_i	ω_i
1	E_b	682,87	4,1692	40,535	6,7601
2	R_b	4,8779	2,4008	1,5038	3,4033
3	σ_{b0}	1,4285	4,1841	0,1256	6,3453
4	ε_{b0}	0,0058	-0,941	0,0135	-1,752
5	σ_{b2}	0,8399	4,5969	0,057	6,9929
6	ε_{b2}	0,01	-1,379	0,03	-2,417

Разработанные деграционные модели позволяют определить коэффициенты a , b и c при неизвестных функции (6) методом нормируемых параметров при любом значении ϕ или ϕ_m , а значит, получить функцию, описывающую нелинейную диаграмму деформирования материала в любой момент времени (см. рисунок 10):

$$\sigma_i = a(\phi)\varepsilon_i^5 + b(\phi)\varepsilon_i^3 + c(\phi)\varepsilon_i. \quad (6)$$

Представленные на рисунке 10 диаграммы деформирования позволяют выполнить расчет конструкций с учетом физической нелинейности бетона.

Так, расчет по прочности нормальных сечений изгибаемых балок выполняли из условия:

$$M \leq M_{ult}(\phi_m), \quad (7)$$

где M – изгибающий момент от внешней нагрузки;

$M_{ult}(\phi_m)$ – предельный изгибающий момент, который может быть воспринят сечением балки с учетом мультифрактальной деградиационной функции, определяли по формуле:

$$M_{ult}(\phi_m) = R_b(\phi_m) b x_1(\phi_m) (h_0 - 0,5 x_1(\phi_m)), \quad (8)$$

где $x_1(\phi_m) = \sqrt{(0,5 \mu_f \alpha_2(\phi_m) h_0)^2 + \mu_f \alpha_2(\phi_m) h_0^2 \omega} - 0,5 \mu_f \alpha_2(\phi_m) h_0$ –

значение высоты сжатой зоны бетона поперечного сечения балок, здесь:

$$\mu_f = A_f b^{-1} h_0^{-1};$$

$$\alpha_2(\phi_m) = E_f E_{b2}^{-1}(\phi_m);$$

$$E_{b2}(\phi_m) = R_b(\phi_m) \varepsilon_{b2}^{-1}(\phi_m).$$

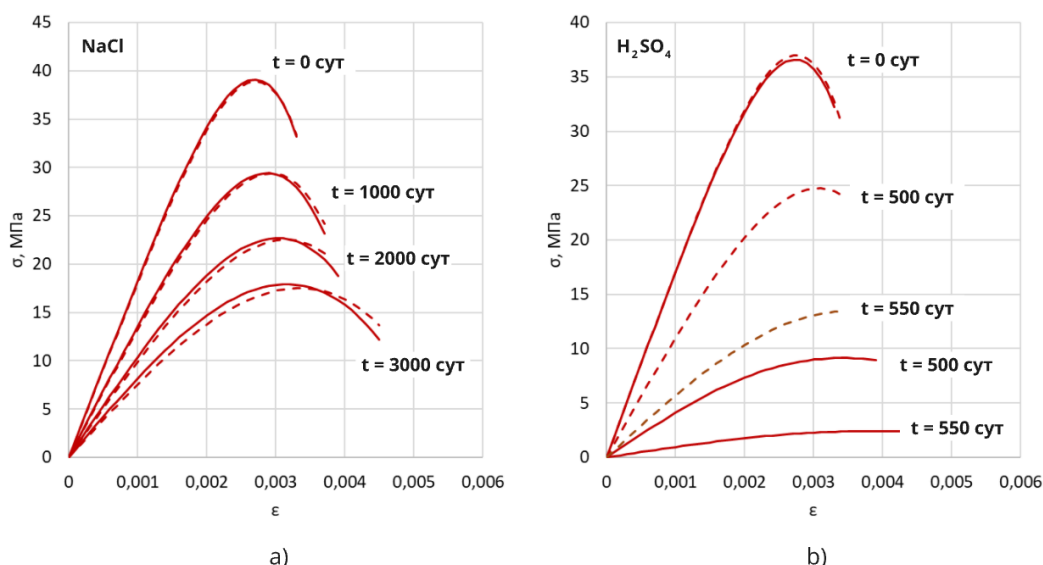


Рисунок 10 – Диаграммы деформирования бетона при сжатии в зависимости от времени воздействия агрессивной среды t : а – NaCl; б – H_2SO_4 (штриховая линия на графиках соответствует мультифрактальным моделям)

Снижение величины $M_{ult}(\phi_m)$ (см. рисунок 11) с течением времени выполнили при следующих входных параметрах, соответствующих данным для экспериментальной балки № 09: $L = 0,9$ м; $b = 0,05$ м; $h = 0,1$ м; $a = 0,0026$ м.

Зная величину M – изгибающего момента от внешней нагрузки, по графику можно определить момент наступления предельного состояния T_1 по первой группе предельных состояний (1ГПС).

Для определения остаточного ресурса по второй группе предельных состояний (2ГПС), момента наступления предельного состояния – T_2 , применили следующий алгоритм.

Расчет балок по прогибам выполняют из условия:

$$w \leq w_{ult}, \quad (9)$$

где w – прогиб балки от внешней нагрузки;

w_{ult} – предельный допустимый прогиб балки.

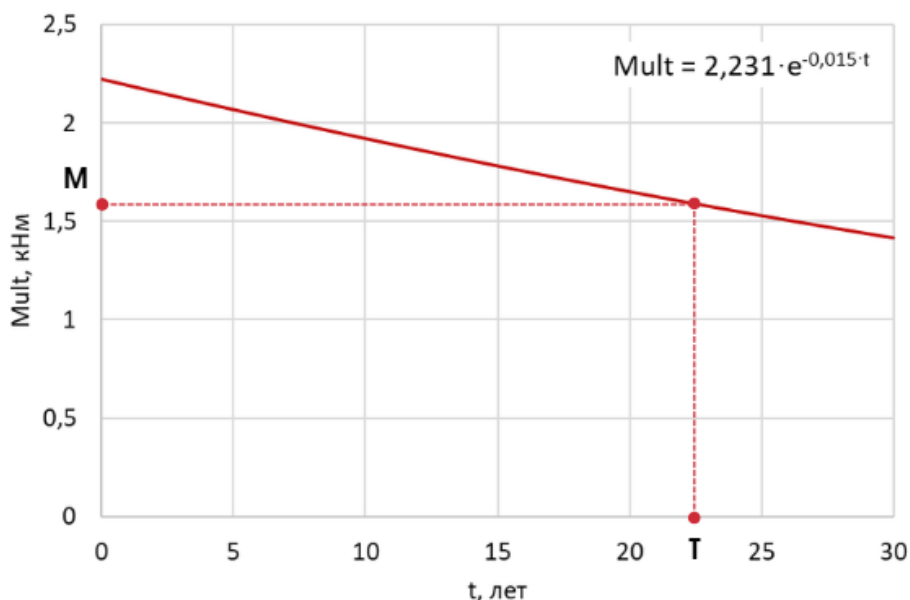


Рисунок 11 – Снижение предельного изгибающего момента во времени с обозначением момента наступления предельного состояния (T_1) при $M = M_{ult}$

Для экспериментальных балок пролетом, равным 0,9 м, предельный допустимый прогиб согласно СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85* (с Изменениями N 1–5)» составляет 7,5 мм.

Согласно СП 295.1325800.2017 для изгибаемых элементов постоянного по длине элемента сечения, а также для учета процесса деградации структуры бетона во времени, формула жесткости поперечного сечения примет вид:

$$J(\phi_m) = E_{b1}(\phi_m) I_{red}, \quad (10)$$

где $E_{b1}(\phi_m) = 0,85E_b(\phi_m)$ – модуль деформации сжатого бетона с учетом величины мультифрактальной деградационной функции;

$I_{red} = bh^3/12 + \alpha_f A_f (h_0 - x_1)^2$ – момент инерции приведенного поперечного сечения относительно его центра тяжести.

В рамках пошаговой схемы нагружения (когда каждая последующая ступень увеличивает внешнюю нагрузку на некоторую величину ΔP , а итоговый вектор внешних сил F соответствует суммарному значению) важно на каждом уровне нагрузки обеспечить точное удовлетворение уравнений равновесия. Данные уравнения, если балка работает в упругой стадии, можно записать в виде:

$$Kw = F, \quad (11)$$

где K – глобальная матрица жесткости, зависящая от неизменного параметра EI .

Однако для физически нелинейной балки жесткость сечения меняется с увеличением прогиба, поэтому матрица K фактически становится функцией текущего вектора перемещений w , то есть $K = K(w)$. В таком случае равновесие описывается нелинейной системой $K(w)w = F$, решение которой за один шаг невозможно. Необходима итерационная схема, позволяющая переопределять $K(w)$ после каждого приближения к истинному решению.

Одним из самых распространенных и эффективных методов такого рода является метод Ньютона-Рафсона, сущность которого представлена решением нелинейного векторного уравнения:

$$R(w) = F - K(w)w = 0, \quad (12)$$

где $R(w)$ – остаток решения – дисбаланс системы сил на текущем шаге.

Таким образом, в итоге за несколько итераций (обычно 5–10) удастся найти $w^{(\infty)}$, удовлетворяющий нелинейной системе с заданной точностью.

После завершения итераций для уровня нагрузки $k\Delta P$ определяют текущую кривизну, а затем деформацию $\varepsilon(x_i, z) \approx -zw_i$. Если на каком-либо участке $\varepsilon \geq \varepsilon_{b0}$ – расчет считают законченным и фиксируют предельное значение нагрузки.

Таким образом, итерационный метод Ньютона-Рафсона обеспечивает точное решение нелинейной задачи равновесия балок на каждом фиксированном уровне нагрузки, а инкрементный (пошаговый) характер приложения нагрузки помогает избежать больших скачков деформаций и сохранять устойчивую сходимость.

Была разработана программа для ЭВМ, которая способна выполнять расчет балок со следующими параметрами.

На вход программы подаются значения t и $\phi_m(t)$, которые позволяют определить $\sigma_{b0}(\phi_m)$, $\varepsilon_{b0}(\phi_m)$, $\sigma_{b2}(\phi_m)$, $\varepsilon_{b2}(\phi_m)$ и $E_b(\phi_m)$. Затем, методом нормируемых параметров определяются коэффициенты для формулы (6), и запускается итерационный процесс вычисления прогибов балок (w_i) для каждого шага нагружения (ΔP_i). Таким образом, варьируя значением t , можно построить графики изменения прогибов балок от величины нагрузок в любой момент времени.

На рисунке 12, а представлен результат расчета балки № 09 в моменты времени: $t_1 = 0$ сут; $t_2 = 1000$ сут; $t_3 = 2000$ сут; $t_4 = 3000$ сут.

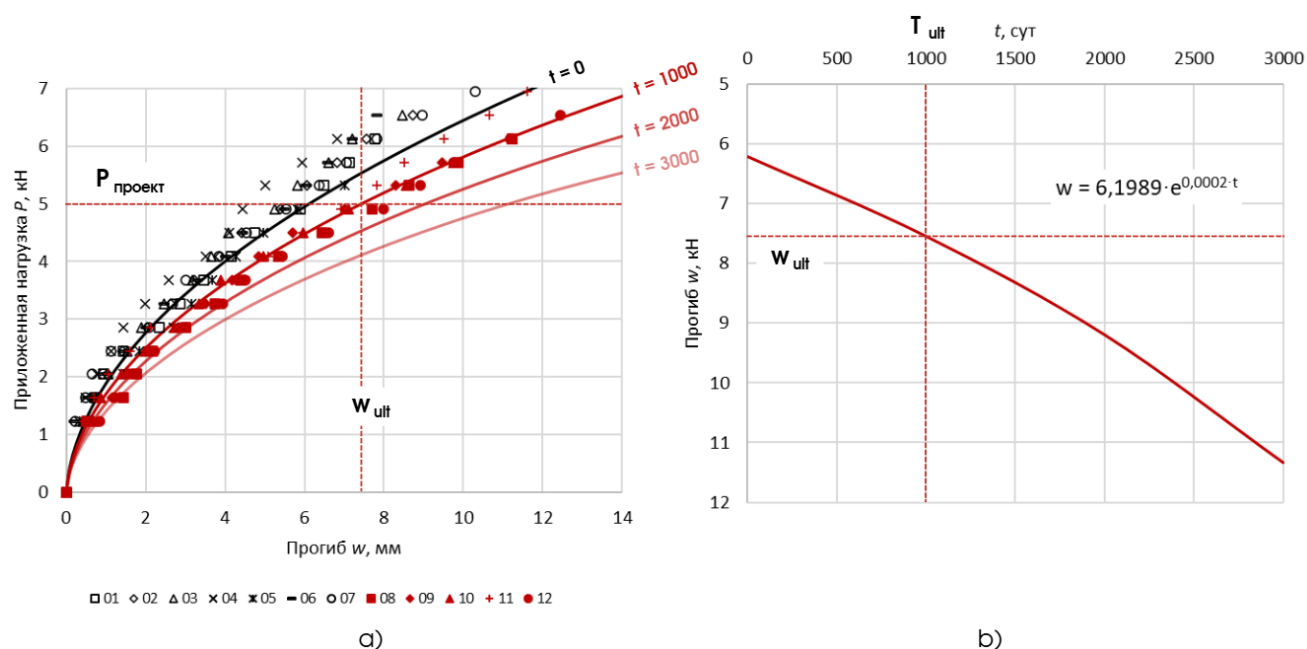


Рисунок 12 – Определение момента наступления предельного состояния для балки № 09 по второй группе предельных состояний (прогибов)

Зная величину проектной для данной балки нагрузки ($P_{\text{проект}}$), можно определить точки на графиках, соответствующие проектным прогибам $w_{1...4}$. Из данного расчета видно, что с течением времени прогиб балки от проектной (неизменной) нагрузки будет увеличиваться. Этот процесс вызван текучестью бетона и ускорен воздействием агрессивной среды.

Откуда следует, что, зная величину предельного для данной балки прогиба $w_{ult} = 7,5$ мм, можно определить момент наступления предельного состояния (см. рисунок 12, *b*).

Разработанный и представленный выше алгоритм позволяет с высокой степенью точности определять остаточный ресурс армированных бетонных балок, подверженных воздействию жидких агрессивных сред (дополнительно на рисунке 12, *a* представлены экспериментальные точки для всех 12 балок), по обеим группам предельных состояний.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования

В результате выполненного исследования разработана методика оценки остаточного ресурса армированных бетонных конструкций, работающих в условиях совместного воздействия механических нагрузок и жидких агрессивных сред, на основе фрактальных моделей деградации структуры бетона. Основные итоги и выводы работы можно сформулировать следующим образом:

1. Разработанный подход к оценке остаточного ресурса армированных бетонных конструкций на основе фрактальных моделей деградации структуры бетона обеспечивает более глубокое и объективное описание процессов разрушения при комплексном воздействии нагрузок и агрессивных сред.

2. Установленные корреляционные зависимости между упруго-прочностными характеристиками и фрактальными параметрами позволяют формировать надежный инструмент прогноза долговечности и остаточного ресурса, учитывающий кинетику деградации на различных стадиях эксплуатации.

3. Предложенный алгоритм определения структурной неоднородности бетона через расчет фрактальной размерности диаграмм деформирования обеспечивает корректный учет дискретности экспериментальных данных и расширяет возможности анализа механических свойств материалов в реальных условиях эксплуатации.

4. Разработанная нелинейная деформационная модель сжатого бетона в виде модифицированной полиномиальной функции обеспечивает высокую точность аппроксимации экспериментальных диаграмм и позволяет формировать осесимметричные эпюры модулей деформации, что существенно повышает точность расчетов конструкций численными методами.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы

Дальнейшие научные исследования будут продолжаться в нескольких направлениях:

1. Разработка и унификация фрактальных деградационных функций, с верификацией моделей на реальных армированных бетонных конструкциях, получивших коррозионные повреждения в процессе эксплуатации.
2. Разработка методов фрактального и мультифрактального анализа структурных неоднородностей строительных материалов и конструкций.
3. Разработка моделей машинного обучения для оценки остаточного ресурса и прогнозирования долговечности строительных конструкций.

Основные положения и результаты диссертационной работы опубликованы в следующих научных изданиях:

в рецензируемых научных изданиях, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук:

1. Моделирование работы железобетонных конструкций с учетом совместного действия механических нагрузок и агрессивных сред / В. П. Селяев, П. В. Селяев, Е. Л. Кечуткина, Д. Р. Бабушкина, С. Ю. Грязнов // Эксперт: теория и практика. 2021. № 1 (10). С. 19–24. https://doi.org/10.51608/26867818_2021_1_19 (К2; ИФ РИНЦ – 0,736; 0,31/0,11 у. п. л., УБС – 4).
2. Определение прогибов балки из нелинейно-упругого материала методом Ритца-Тимошенко при аппроксимации диаграмм деформирования комбинированными степенными зависимостями / В. П. Селяев, В. Н. Уткина, С. Ю. Грязнов, Д. Р. Бабушкина // Эксперт: теория и практика. 2021. № 2 (11). С. 42–50. https://doi.org/10.51608/26867818_2021_2_42 (К2; ИФ РИНЦ – 0,736; 0,43/0,32 у. п. л., УБС – 4).
3. Верификация зависимостей, аппроксимирующих диаграммы деформирования бетонов цементного и полимерного методом нормируемых показателей / В. П. Селяев, П. В. Селяев, С. Ю. Грязнов, Д. Р. Бабушкина // Строительство и реконструкция. 2021. № 1 (93). С. 125–133. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2021-93-1-125-133> (К1; ИФ РИНЦ – 0,827; 0,45/0,35 у. п. л., УБС – 1).
4. Селяев, В. П. Анализ полиномиальной зависимости пятой степени при аппроксимации экспериментальных диаграмм деформирования цементного бетона и полимербетона методом нормируемых показателей / В. П. Селяев, С. Ю. Грязнов, Д. Р. Бабушкина // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. 2021. № 1. С. 19–27. <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2021.1.19> (К3; ИФ РИНЦ – 0,402; 0,49/0,39 у. п. л., УБС – 4).
5. Селяев, В. П. Нелинейные модели деградации полимерных композитов, работающих в агрессивных средах / В. П. Селяев, С. Ю. Грязнов, Д. Р. Бабушкина // Региональная архитектура и

строительство. 2021. № 2 (47). С. 5–15. (К1; ИФ РИНЦ – 0,615; 0,70/0,55 у. п. л., УБС – 2).

6. Влияние вида функциональной зависимости « $\sigma - \epsilon$ » на расчетные прогибы балки из нелинейно деформируемого материала / В. П. Селяев, С. Ю. Грязнов, Е. С. Безрукова, Д. Р. Бабушкина // Эксперт: теория и практика. 2022. № 1 (16). С. 46–54. https://doi.org/10.51608/26867818_2022_1_46 (К2; ИФ РИНЦ – 0,736; 0,45/0,35 у. п. л., УБС – 4).

7. Фрактальная квантово-механическая модель деформирования и разрушения бетона / В. П. Селяев, П. В. Селяев, А. Л. Лазарев, С. Ю. Грязнов, М. Ю. Аверкина // Региональная архитектура и строительство. 2022. № 4(53). С. 31–40. https://doi.org/10.54734/20722958_2022_4_31 (К1; ИФ РИНЦ – 0,615; 0,44/0,12 у. п. л., УБС – 2).

8. Прочность и Механика разрушения фрактальной структуры бетона / В. П. Селяев, П. В. Селяев, С. Ю. Грязнов, М. Ю. Аверкина // Эксперт: теория и практика. 2023. № 1 (20). С. 35–43. https://doi.org/10.51608/26867818_2023_1_35 (К2; ИФ РИНЦ – 0,736; 0,56/0,13 у. п. л., УБС – 4).

9. Selyaev, V. P. Definition of the Beams From a Nonlinearly Deformed Material by the Ritz-Timoshenko Methods and Finite Differences Taking Into Account the Degradation Rigidity Functions / V. P. Selyaev, S. Yu. Gryaznov, D. R. Babushkina // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2022. Vol. 18, No. 2. P. 85–97. <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2022-18-2-85-97> (К1; ИФ РИНЦ – 0,688; 0,81/0,65 у. п. л., УБС – 1).

в сборниках научных трудов:

10. Моделирование работы железобетонных конструкций при совместном воздействии механических и химических нагрузок / В. П. Селяев, П. В. Селяев, С. Ю. Грязнов [и др.] // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2021 году : Сборник научных трудов РААСН / Российская академия архитектуры и строительных наук. Том 2. – Москва : Издательство АСВ, 2022. – С. 421-433.

11. Грязнов, С. Ю. О влиянии дискретности экспериментальных диаграмм деформирования цементных композитов на величину фрактальной размерности / С. Ю. Грязнов // Актуальные вопросы архитектуры и строительства : Материалы двадцать второй Международной научно-технической конференции, посвященной 105-летию со дня рождения В.А. Карташова, Саранск, 05-06 марта 2024 года. – Саранск: Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, 2024. – С. 50-57.

12. Грязнов, С. Ю. Дифференциальный анализ дискретно-непрерывных экспериментальных диаграмм деформирования цементных композитов / С.Ю. Грязнов // Качество жизни: архитектура, строительство, транспорт, образование : Сборник материалов Международной научно-практической конференции, Иваново, 21-24 марта 2024 года. – Иваново: Ивановский государственный политехнический университет, 2024. – С. 77-79.

13. Грязнов, С. Ю. Фрактальный анализ диаграмм деформирования с применением методов машинного обучения / С. Ю. Грязнов // Долговечность строительных материалов, изделий и конструкций : сб. науч. ст. по материалам Международной науч.-техн. конф., проводимой в рамках деятельности заседания Научного совета Российской академии архитектуры и строительных наук «Механика разрушения бетона, железобетона и других строительных материалов», Саранск, 26-28 марта 2025 года. – Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2025. – С. 25-35.

в объектах интеллектуальной собственности:

14. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024664260 Российская Федерация. Fractal 1.0 : № 2024663518 : заявл. 11.06.2024 : опубл. 18.06.2024 / С. Ю. Грязнов.

15. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025618038 Российская Федерация. Fractal analysis of experimental discrete-continuous stress-strain diagram of material (version 1.0) : № 2025615820 : заявл. 13.03.2025 : опубл. 01.04.2025 / С. Ю. Грязнов, Д. Ю. Грязнов.

16. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025660991 Российская Федерация. Reduction of experimental discrete-continuous stress-strain diagrams of concrete to a standard form (version 1.0) : № 2025618787 : заявл. 13.04.2025 : опубл. 29.04.2025 / С. Ю. Грязнов, Д. Ю. Грязнов.

17. Патент № 2848142 С1 Российская Федерация, МПК G01N 3/08. Способ определения фрактальной размерности экспериментальной диаграммы деформирования твердого тела : № 2025107189 : заявл. 25.03.2025 : опубл. 16.10.2025 / С. Ю. Грязнов, Д. Ю. Грязнов ; заявитель Грязнов Сергей Юрьевич.

Грязнов Сергей Юрьевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА
АРМИРОВАННЫХ БЕТОННЫХ БАЛОК, ПОДВЕРЖЕННЫХ
ВОЗДЕЙСТВИЮ ЖИДКИХ АГРЕССИВНЫХ СРЕД**

2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Подписано в печать 22.01.26. Объем 1,5 п. л.

Тираж 100 экз. Заказ № 64.

Типография Издательства Мордовского университета
430005, Республика Мордовия, г. Саранск, ул. Советская, 24