

На правах рукописи



НИКУЛИНА ЮЛИЯ АЛЕКСАНДРОВНА

**УПРАВЛЕНИЕ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ГРАЖДАНСКИХ
ЗДАНИЙ С ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫМ КАРКАСОМ С УЧЕТОМ
ВЛАЖНОСТНЫХ УСЛОВИЙ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

2.1.14. Управление жизненным циклом объектов строительства

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Белгород –2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»

Научный руководитель доктор технических наук, профессор
Сулейманова Людмила Александровна

Официальные оппоненты **Стельмах Сергей Анатольевич**
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Донской государственный
технический университет», заведующий
кафедрой «Строительство уникальных
зданий и сооружений»

Горбанева Елена Петровна
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Воронежский
государственный технический
университет», доцент кафедры
технологии, организации строительства,
экспертизы и управления недвижимостью

Ведущая организация ФГБОУ ВО «Ивановский
государственный политехнический
университет»

Защита состоится «02» июля 2026 года в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета 24.2.276.05, созданного на базе ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» по адресу: 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, ауд. 214 ГУК.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» и на сайте https://gos_att.bstu.ru/dis/Nikulina

Автореферат разослан «06» мая 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



С.М. Есипов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. На сегодняшний день одним из наиболее важных направлений в области строительства является повышение эффективности управления жизненным циклом объекта капитального строительства.

Объекты капитального строительства отличаются многообразием конструктивных схем и применяемых конструкций и материалов, но традиционно в Российской Федерации здания с железобетонными несущими конструкциями составляют наибольшую долю существующих и возводимых объектов, в связи с чем актуальным вопросом является совершенствование путей управления такими объектами.

Влияние на работу железобетонных конструкций в процессе их изготовления и эксплуатации оказывают влажностные условия окружающей среды. Поскольку в процессе эксплуатации влажностные условия нестационарны, определение сроков исчерпания несущей способности конструкций следует рассчитывать с учетом данных изменений. Наиболее перспективным механизмом учета влажностных условий является применение современных методов анализа данных на стадии проектирования для прогнозирования изменений в режимах работы несущих железобетонных конструкций объекта капитального строительства, что позволит определять сроки исчерпания ими несущей способности, и, соответственно, сроки эксплуатации объекта капитального строительства в целом, а также планировать сроки и количество текущих и капитальных ремонтов, реконструкции.

Исследование длительной прочности бетона несущих железобетонных конструкций является сложной задачей, поскольку затруднено получение экспериментальных данных в связи со сроком эксплуатации зданий в несколько десятков лет, в течение которого реализуется процесс изменения параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкций.

Работа выполнена в рамках проекта №Оф-14/23 программы развития БГТУ им. В.Г. Шухова «Приоритет 2030» на 2021-2030 гг.

Степень разработанности темы. В исследованиях по обеспечению надежности и долговечности железобетонных конструкций при управлении жизненным циклом гражданских зданий с железобетонным каркасом основное внимание уделено вопросам оценки несущей способности и трещиностойкости элементов, а также разработке расчетных моделей, учитывающих совместную работу бетона и арматуры, воздействие эксплуатационных нагрузок и агрессивных сред. Значительный объем работ посвящен методикам диагностики технического состояния по результатам натурных обследований и неразрушающего контроля, а также подходам к назначению ремонтно-восстановительных мероприятий и методов усиления конструкций.

В то же время недостаточно изученными, но актуальными в настоящее время являются: учет влажностных условий в помещениях каркасных зданий в период их эксплуатации; особенности комплексного прогнозирования остаточного ресурса железобетонных элементов каркасных зданий с учетом длительной эксплуатации и вариативности фактических характеристик материалов; методические подходы к использованию интеллектуальных систем и алгоритмов машинного обучения для интерпретации результатов обследований, построения прогностических моделей деградации несущей способности железобетонных конструкций и принятия на их основе управленческих решений.

Цель работы. Разработка научно обоснованной методики управления жизненным циклом гражданских зданий с железобетонным каркасом с учетом влажностных условий их эксплуатации на основании прогнозируемого срока истощения несущей способности железобетонных элементов.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

– исследование современных научных подходов в управлении жизненным циклом объектов капитального строительства с позиции увеличения продолжительности их жизненного цикла;

– разработка методики определения предельных величин деформативно-прочностных характеристик бетонов в составе несущих железобетонных конструкций каркасных гражданских зданий после их длительной эксплуатации с учетом влажностных условий;

– разработка методики определения параметров НДС изгибаемых и внецентренно сжатых несущих железобетонных конструкций каркасных гражданских зданий в различные периоды длительной эксплуатации с учетом изменения влажностных условий;

– обоснование параметров, разработка, оптимизация архитектуры и обучение модели искусственной нейронной сети, обеспечивающей прогнозирование величины остаточного ресурса железобетонных конструкций каркаса зданий с учетом влажностных условий их эксплуатации с последующей валидацией спрогнозированных нейросетью значений с данными обследования эксплуатируемого объекта капитального строительства;

– разработка механизма принятия управленческих решений, основанного на интерпретации спрогнозированных нейросетью значений остаточного ресурса железобетонных конструкций в составе объектов капитального строительства с технико-экономическим обоснованием предлагаемых мероприятий, способствующих увеличению срока службы проектируемого объекта капитального строительства, апробация результатов исследований.

Объектом диссертационного исследования являются гражданские здания с железобетонным каркасом, в отношении которых осуществляется оценка и обоснование увеличения сроков их безопасной эксплуатации с учетом влажностных условий.

Предметом диссертационного исследования являются предельные сроки безопасной эксплуатации гражданских зданий с железобетонным каркасом с учетом возможности их изменения на основании принятия рациональных управленческих решений на этапах проектирования и эксплуатации.

Научная новизна работы. Обосновано и экспериментально подтверждено организационно-техническое решение, заключающееся в совершенствовании механизмов управления жизненным циклом объектов капитального строительства с разработкой модели искусственной нейронной сети для прогнозирования сроков исчерпания несущей способности несущих железобетонных конструкций каркасных гражданских зданий с учетом влажностных условий их эксплуатации.

Разработана методика прогнозирования деформативно-прочностных свойств бетона несущих железобетонных конструкций с учетом влажностных условий для оценки параметров их напряженно-деформированного состояния в различные периоды длительной эксплуатации с определением остаточного ресурса.

Разработана модель искусственной нейронной сети для оценки и прогнозирования остаточного ресурса объекта капитального строительства с учетом влажностных условий его эксплуатации и предложен механизм оптимизации модели посредством оценки влияния ее архитектуры на время обучения и точность прогноза.

Разработаны научно-теоретические основы технологии управления жизненным циклом гражданских зданий с железобетонным каркасом, базирующиеся на нейросетевом прогнозировании значений остаточного ресурса несущих конструкций с учетом влажностных условий их эксплуатации и предложении на его основе рациональных технических решений по увеличению срока безопасной эксплуатации объектов капитального строительства.

Теоретическая и практическая значимость работы. Дополнены теоретические представления о возможности применения искусственной нейронной сети для прогнозирования остаточного ресурса несущих железобетонных конструкций каркасных гражданских зданий с учетом влажностных условий их эксплуатации.

Обоснованы параметры предельных сопротивлений и деформаций бетона при его неоднородном сжатии и растяжении для трех граничных случаев влажностных условий эксплуатации железобетонных конструкций в составе каркасных гражданских зданий.

Разработана методика определения напряженно-деформированного состояния изгибаемых и внецентренно сжатых несущих железобетонных конструкций каркасных гражданских зданий в различные периоды их эксплуатации с учетом влажностных условий.

Предложен механизм принятия управленческих решений для гражданских зданий с железобетонным каркасом, способствующий увеличению срока безопасной эксплуатации до 30 % на этапе проектирования и до 10 % на этапе эксплуатации на основе использования методики определения параметров напряженно-деформированного состояния несущих железобетонных конструкций при длительных нагрузках в зависимости от влажностных условий окружающего воздуха в помещениях.

Методология и методы исследования. Теоретической и методологической основой данной работы служат результаты фундаментальных и прикладных исследований длительной прочности железобетонных конструкций. При разработке исследовательского подхода и проведении численного эксперимента применялись современные методы системного анализа, математического моделирования и статистической обработки данных. Применительно к управлению жизненным циклом объектов капитального строительства использовались системный, ситуационный, критериальный и другие подходы.

Положения, выносимые на защиту:

– научно-теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение эффективности технологии управления жизненным циклом гражданских зданий, заключающейся в использовании моделей искусственных нейронных сетей для прогнозирования сроков безопасной эксплуатации несущих железобетонных конструкций каркаса проектируемых и эксплуатируемых гражданских зданий;

– методика определения параметров НДС изгибаемых и внецентренно сжатых несущих железобетонных конструкций каркасных гражданских зданий на промежуточных этапах или на этапе исчерпания их остаточного ресурса на основании величин деформативно-прочностных характеристик бетонов, уточненных для различных значений относительной влажности воздуха при длительной эксплуатации;

– результаты обоснования параметров, разработки оптимизации архитектуры и обучения модели искусственной нейронной сети, обеспечивающей прогнозирование величины остаточного ресурса железобетонных конструкций каркасных гражданских зданий с учетом влажностных условий их эксплуатации;

– результаты прогнозирования остаточного ресурса несущих конструкций каркасного гражданского здания и рекомендации для продления его эксплуатации с последующей валидацией спрогнозированных

нейросетью значений с данными обследования эксплуатируемого каркасного гражданского здания;

– механизм принятия управленческих решений, основанный на интерпретации спрогнозированных нейросетью значений остаточного ресурса железобетонных конструкций объектов капитального строительства, обеспечивающий выбор и технико-экономическое обоснование его эффективных конструктивных решений.

Степень достоверности результатов обеспечена применением научных принципов и обоснована выполненным комплексом исследований, в котором использовались различные методы. Обеспечена сопоставимость полученных результатов с общепринятыми данными, фактами и работами российских и зарубежных исследователей.

Апробация научно-исследовательской работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на: IX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и научно-технический прогресс» (Губкин, 2016); I Международной научно-практической конференции «Архитектура. Строительство. Информационные технологии» (Новороссийск, 2023); III, VII, VIII, IX Международных научно-практических конференциях «Наука и инновации в строительстве» (Белгород, 2019, 2023, 2024, 2025); II Международной научно-практической конференции (посвященной 85-летию проф., д.т.н. З.М. Хадонова) «Региональный строительный комплекс: проблемы и перспективы» (Владикавказ, 2026).

Внедрение результатов исследований. Результаты диссертационной работы прошли апробацию в производственных условиях в проектной организации ООО «Центрогиппроруда» (Белгород) при разработке проекта реконструкции административно-бытового корпуса Михайловского ГОКа им. А. В. Варичева в г. Железногорск (Курская обл.), а также на предприятии ООО «ЭКОМИР ЖБК-1» (Белгород) при проведении мониторинга технического состояния железобетонных конструкций в эксплуатируемых зданиях на ул. Виктора Лосева в г. Белгород с разработкой рекомендаций, обеспечивающих повышение срока их безопасной эксплуатации.

Имеются соответствующие акты о внедрении результатов диссертационной работы на следующих предприятиях:

– ООО «Центрогиппроруда» (Белгород) при разработке проекта реконструкции административно-бытового корпуса Михайловского ГОКа им. А. В. Варичева в г. Железногорск (Курская обл.);

– ООО «ЭКОМИР ЖБК-1» (Белгород) при проведении мониторинга технического состояния железобетонных конструкций в эксплуатируемых зданиях на ул. Виктора Лосева в г. Белгород с разработкой рекомендаций, обеспечивающих повышение срока их безопасной эксплуатации.

Теоретические и экспериментальные положения диссертационной работы используются в учебном процессе при подготовке бакалавров, магистрантов по направлению «Строительство» и аспирантов по научной специальности 2.1.14 «Управление жизненным циклом объектов строительства».

Публикации. Основные положения работы изложены в 15 публикациях, в том числе: 6 статей в российских журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК РФ. Получены свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025683583 и № 2020616406, а также свидетельство о регистрации ноу-хау № 20260004.

Личный вклад. Личный вклад заключается в активном участии на всех этапах исследования, включая сбор, анализ и систематизацию теоретических данных, проведение численного эксперимента, его подготовку и анализ результатов, самостоятельное формулирование положений, которые представлены на защите, отражая основные результаты и выводы, подчеркивающие научную новизну, теоретическую и практическую значимость работы.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, приложений. Результаты изложены на 192 страницах машинописного текста, включающего 24 таблицы, 57 рисунков, список литературы из 181 источника, 8 приложений.

Область исследований соответствует паспорту специальности 2.1.14. Управление жизненным циклом объектов строительства по пп. 3 и 7: п. 3. Исследование и формирование методов разработки, видов обеспечения, критериев, моделей описания и оценки эффективности решения задач управления жизненным циклом объектов капитального строительства с использованием технологий информационного и математического моделирования, системного анализа, автоматизации и оптимизации принятия решений; п. 7. Разработка методов и средств организации и управления жизненным циклом объектов капитального строительства в условиях ограничения доступности ресурсов, а также технических, экономических, экологических, социальных и других видов рисков. Методы и алгоритмы прогнозирования и оценки эффективности, качества и надежности строительных систем, поддержка принятия организационно-технических решений на всех этапах жизненного цикла объектов капитального строительства.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Управление жизненным циклом объекта строительства является сложным, многогранным процессом, который осуществляется в тече-

ние длительного по времени периода с учетом отличительных характеристик объекта строительства, множества различных участников, с необходимостью учета влияния на технические решения нормативно-правового регулирования и ресурсных ограничений, а также условий эксплуатации, в связи с чем законодательно было закреплено понятие жизненного цикла здания или сооружения.

Существенную долю зданий и сооружений составляют здания с несущим железобетонным каркасом. На железобетонные конструкции в процессе длительной эксплуатации среди прочих аспектов существенное влияние оказывают влажностные условия. Однако отсутствует единая методика расчета длительной прочности бетона, что подтверждает необходимость разработки такой методики, учитывающей воздействия на несущие железобетонные элементы влажностных условий эксплуатации.

В связи с этим *рабочей гипотезой исследования* стало предположение о том, что эффективное управление жизненным циклом гражданских зданий с железобетонным каркасом возможно за счет прогнозирования остаточного ресурса их несущих конструкций нейросетевым анализом формализованной по климатическим, конструктивным и эксплуатационным характеристикам модели, который обеспечивает количественную оценку влияния факторов деградации на НДС несущих конструкций и обоснование рациональных организационно-технических решений по увеличению срока безопасной эксплуатации объекта.

Для подтверждения рабочей гипотезы в части возможности прогнозировать остаточный ресурс железобетонных конструкций каркасных гражданских зданий разработана методика численно-аналитического определения остаточного ресурса изгибаемых и внецентренно сжатых железобетонных элементов каркасных зданий с учетом влажностных условий эксплуатации.

В работах А.М. Невилля, З.Н. Цилосани, С.В. Александровского и других ученых представлены результаты экспериментов, подтверждающих влияние относительной влажности воздуха на деформативно-прочностные характеристики бетона в течение длительного срока эксплуатации. При высоких значениях относительной влажности, увеличение деформаций в конструкции существенно замедляется, при низких значениях относительной влажности – ускоряется. В зависимости от относительной влажности воздуха при эксплуатации бетонных или железобетонных конструкций в СП 63.13330 рекомендовано учитывать следующие влажностные условия эксплуатации: при относительной влажности свыше 75 %, 40-75 % и менее 40 %, также приведены усредненные значения предельных относительных деформаций при длительном осевом сжатии ε_{b0} и растяжении ε_{bt0} и при длительном неоднородном сжатии ε_{b2} и растяжении ε_{bt2} .

Предложено классифицировать диапазоны влажностных условий как благоприятные влажностные условия ($> 75\%$), нормальные влажностные условия ($40-75\%$), неблагоприятные влажностные условия ($< 40\%$).

Расчетные сопротивления бетона сжатию и растяжению приняты в нормах без учета влияния относительной влажности воздуха. Для выполнения конструктивных расчетов изгибаемых и внецентренно сжатых железобетонных элементов при продолжительном действии на них нагрузки в настоящее время применяются прикладные программы для ЭВМ, для которых более целесообразным было бы использование различных по величине значений предельных относительных деформаций при осевом и неоднородном сжатии и растяжении в зависимости от классов бетона для трех диапазонов влажностных условий эксплуатации. Расчетные сопротивления бетона сжатию R_b и растяжению R_{bt} также должны учитывать влияние относительной влажности воздуха в помещениях, в частности, применительно к трем видам влажностных условий эксплуатации.

Принимаем энергетический подход к разрушению бетона для режимно нагруженных железобетонных конструкций, который по предложению профессора В.М. Бондаренко:

$$W_{ст.}^0 = W_{дл.}^0 = const, \quad (1)$$

где $W_{ст.}^0$ – удельная потенциальная энергия бетона непосредственно перед его разрушением при кратковременном нагружении; $W_{дл.}^0$ – то же, при длительном нагружении.

Согласно данному подходу, учет режимности нагружения основан на постулате о сохранении в качестве постоянной величины удельной потенциальной энергии, вызывающей разрушение бетона при сжатии и аналогично при растяжении. На рисунке 1 представлены диаграммы деформирования бетона при неоднородном сжатии для кратковременной нагрузки, а также при длительном нагружении для трех граничных значений рассматриваемых диапазонов влажностных условий эксплуатации.

Аналитическое описание огибающей, проходящей через предельные точки четырех диаграмм деформирования бетона при неоднородном сжатии, представляем дробно-рациональной функцией следующего вида:

$$R_{b,i} = \frac{L_{bc} + K_{bc} \varepsilon_{bu,i}}{1 + N_{bc} \varepsilon_{bu,i} + M_{bc} \varepsilon_{bu,i}^2}, \quad (2)$$

где $R_{b,i}$ – предельное сопротивление бетона неоднородному сжатию на промежуточном i -том этапе эксплуатации железобетонной конструкции с учетом влажностных условий окружающей среды, МПа; $\varepsilon_{bu,i}$ – предельная относительная деформация бетона при неоднородном сжатии на промежуточном i -том этапе эксплуатации железобетонной конструкции с

учетом влажностных условий окружающей среды; L_{bc} , K_{bc} , N_{bc} , M_{bc} – коэффициенты уравнения, вычисляемые из условия прохождения кривой через четыре точки с известными координатами (рис. 1).

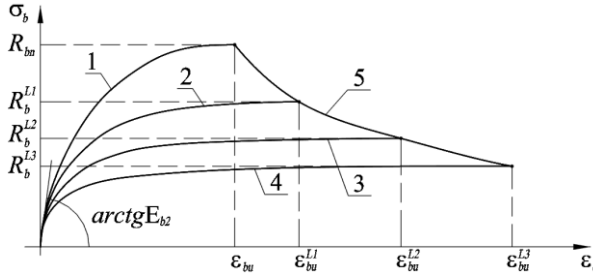


Рисунок 1 – Диаграммы деформирования бетона при неоднородном кратковременном (1) и длительном сжатии с учетом различных влажностных условий эксплуатации: 2 – благоприятные условия; 3 – нормальные условия; 4 – неблагоприятные условия; 5 – изменение предельного сопротивления бетона при неоднородном сжатии в зависимости от его предельной относительной деформации

На основании выполненных ранее исследований ряда ведущих ученых в области прогнозирования длительной прочности бетона при неоднородном сжатии в составе изгибаемых и внецентренно сжатых железобетонных конструкций была предложена следующая зависимость, показывающая изменение прочности бетона с течением времени при эксплуатации в определенных влажностных условиях:

$$R_{b,i}^j = \frac{L_i + K_i t}{1 + N_i t + M_i t^2}, \quad (3)$$

где t – продолжительность эксплуатации несущей конструкции, годы; $R_{b,i}^j$ – предельное сопротивление бетона при неоднородном сжатии на текущий момент времени эксплуатации здания при граничных влажностных условиях, МПа ($j = L_1, L_2, L_3$); коэффициенты нелинейности L_i , K_i , N_i , M_i подбираются в зависимости от класса бетона для трех диапазонов влажностных условий эксплуатации.

Графическое описание зависимости (3) для сжатия представлено на рисунке 2, а. Кривые граничных значений влажностных условий были продлены до уровня предела прочности $0,69R_{bn}$, где коэффициент 0,69 был получен из отношения γ_{b1}/γ_b . Согласно СП 63.13330 $\gamma_{b1} = 0,9$ – коэффициент условий работы бетона в железобетонной конструкции, учитывающий действие на нее только постоянных и длительных нагрузок, а параметр $\gamma_b = 1,3$ является коэффициентом надежности по бетону

при сжатии. Кривая для промежуточного значения относительной влажности в помещении на рисунке 2, *a* (поз. 4) построена по методу интерполяции. По точке пересечения кривой с уровнем $0,69 R_{bn}$ определяется срок службы элемента. Аналогичным образом были получены зависимости для растяжения (рис. 2, *б*).

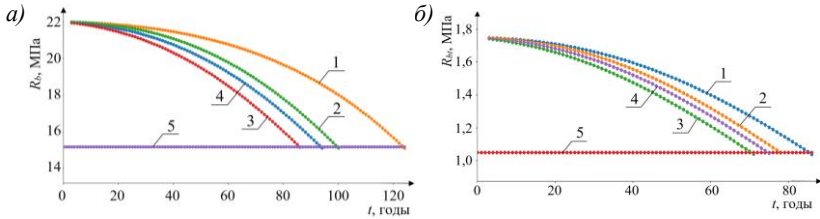


Рисунок 2 – Изменение во времени предельного сопротивления бетона класса В30: *a* – сжатию; *б* – растяжению; 1 – при эксплуатации в благоприятных условиях; 2 – то же, в нормальных условиях; 3 – то же, в неблагоприятных условиях; 4 – то же, в усредненных условиях относительной влажности (60 %); 5 – уровень, соответствующий $0,69R_{bn}$ (*a*) и $0,60R_{bn}$ (*б*)

Методика апробирована на здании школы в г. Пермь со сборным каркасом серии ИИ-04-3. Рассмотрены ригели среднего пролета $l_0 = 5,6$ м: P2-52-57 (обозначим как P1) и P2-72-57 (обозначим как P2).

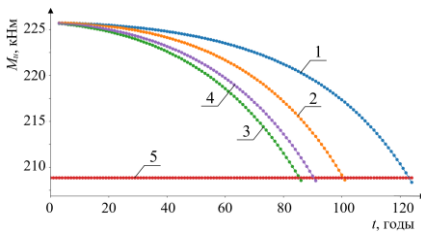


Рисунок 3 – Несущая способность ригеля P1 в зависимости от времени действия нагрузки и влажностных условий эксплуатации: 1 – при эксплуатации в благоприятных условиях; 2 – то же, в нормальных условиях; 3 – то же, в неблагоприятных условиях; 4 – то же, при усредненной относительной влажности (53 %); 5 – уровень, соответствующий несущей способности M_n при $0,69R_{bn}$

Зависимость несущей способности ригеля P1 от времени действия нагрузки и влажностных условий эксплуатации представлена на рисунке 3. Необходимость обработки больших массивов данных при длительной эксплуатации конструкций обусловила применение искусственной нейронной сети (ИНС).

В рамках исследования проведено прогнозирование остаточного ресурса железобетонных конструкций каркаса при их длительной эксплуатации с учетом относительной влажности воздуха с использованием

моделей искусственных нейронных сетей. Реализация исследования осуществлялась с использованием программного пакета STATISTICA

Neural Networks. Топология искусственной нейронной сети предусматривала наличие входного слоя, одного скрытого слоя с варьируемой архитектурой и выходного слоя.

Предварительно была проведена оптимизация архитектуры ИНС путем варьирования числа нейронов скрытого слоя, исходя из которой выделены диапазоны. Оптимальное число нейронов с минимумом ошибки входит в диапазон 12-30 нейронов и равно 26 (Test RMSE = 2,12, $R^2 = 0,88$).

Для формализации выбора архитектуры предложен коэффициент вычислительной эффективности K_0 , – отношение уменьшения погрешности к простоту вычислительных затрат (табл. 1).

Таблица 1 – Сравнительный анализ эффективности архитектур ИНС

Диапазон нейронов	Среднее снижение Test RMSE	Средний прирост времени, с	K_0	Характеристика
2-10	1,40	12	0,117	Высокая отдача от усложнения
12-30	0,28	24	0,012	Зона оптимального баланса
32-50	-0,20 (рост ошибки)	33	< 0	Зона избыточной сложности (переобучение)

В рамках данного исследования разработан обучающий датасет для здания школы в г. Белгород, включающий климатические показатели за 50 лет эксплуатации и параметры несущей способности рассматриваемых конструктивных элементов, такие как среднесуточная температура наружного воздуха (L1); относительная влажность наружного воздуха (L2); скорость ветра (L3); атмосферное давление (L4); относительная влажность в помещении (L5); ориентация конструкции по сторонам света (L6); текущий срок эксплуатации (L7). Поскольку в изгибаемых элементах ресурс исчерпывается раньше, чем во внецентренно сжатых, для датасета принят изгибаемый элемент. По предложенной методике для ригелей P1 и P2 была рассчитана деформативность для прямоугольного сечения, эквивалентного тавровому. Значения прогибов не превышают предельно допустимые. Для расчета остаточного ресурса принимаем несущую способность.

Структура разработанной ИНС представлена на рисунке 4.

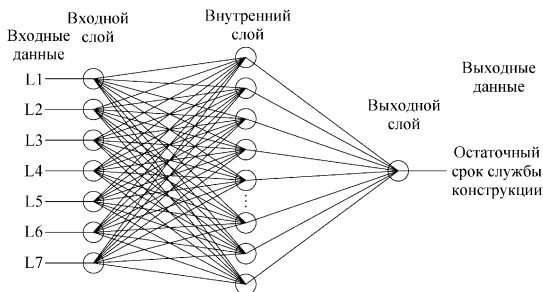


Рисунок 4 – Структура разработанной ИНС

Для обучения модели ИНС датасет был разделен на обучающую (70 % данных), валидационную (15 %) и тестовую (15 %) выборки. Количество нейронов в скрытом слое варьировалось от 12 до 30 с шагом 2, число эпох обучения составило 2000.

Наилучшая точность достигнута при 26 нейронах с минимальными ошибками на обучающей и тестовой подвыборках в интервале 0,978–0,990, что представлено на рисунке 5.

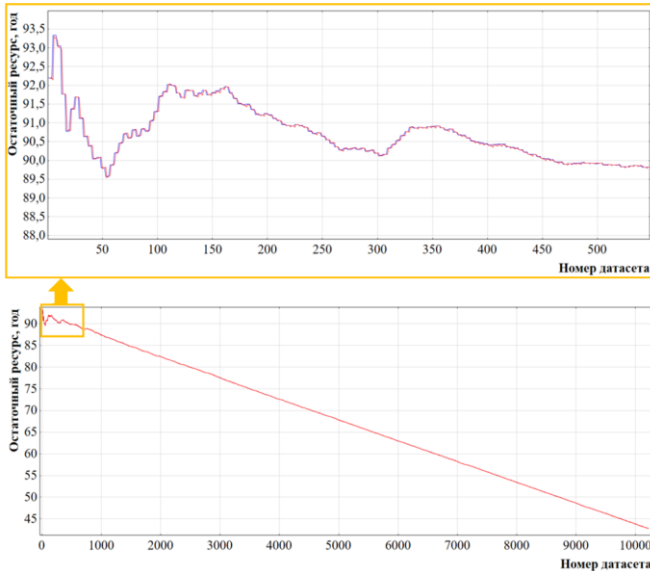


Рисунок 5 – График прогнозов для сети с выборкой тренировки, теста и валидации на основе обучающего датасета:

— фактические значения; — прогнозные значения

Высокая сходимость экспериментальных и прогнозируемых значений подтверждает, что ИНС достоверно воспроизводит закономерности изменения остаточного ресурса, а обучающая выборка в достаточной мере отражает характерные особенности деградации конструкций. Результаты сравнения прогнозных и экспериментальных величин показаны на рисунке 6, а, где плотное расположение точек вдоль линии соответствия свидетельствует об адекватности модели.

Гистограмма остатков (рис. 6, б) демонстрирует нормальное распределение с симметрией относительно нуля, что указывает на отсутствие погрешности прогнозирования и корректность регрессионной модели. Среднеквадратичная ошибка прогнозирования не превышает 1,2, что подтверждает адекватность результатов.

С целью верификации прогностической способности и оценки степени связывания алгоритмических нейросетевых моделей была проведена процедура их внешней валидации на независимых данных обследования здания школы в г. Пермь. Прогнозируемый методикой срок службы четырех ригелей – 51 год, нейросетью – 52,9 года (отклонение 3,7 %), что подтверждает применимость ИНС для прогнозирования остаточного ресурса зданий со сборным железобетонным каркасом.

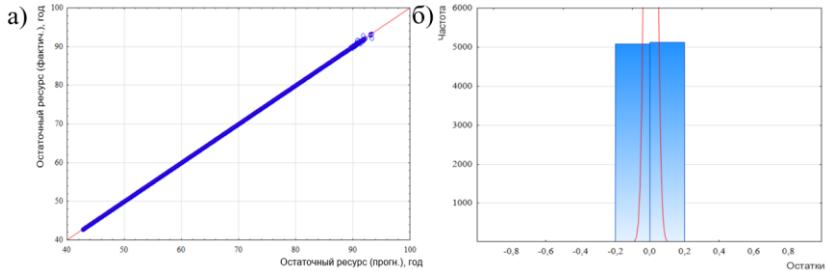


Рисунок 6 – Результаты обучения ИНС (а) и гистограмма остатков временного ряда (б) для данных обучающего датасета

Верификация разработанного механизма выполнена на проектируемом здании школы в г. Самара, где прогнозируемый остаточный ресурс составил 65,5 лет (рис. 7).

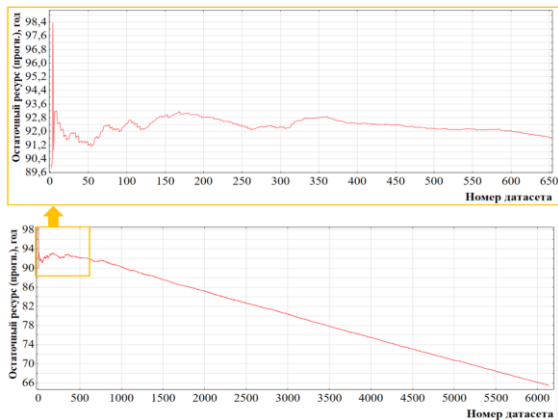


Рисунок 7 – График изменения остаточного ресурса здания школы в г. Самара

Рассмотрено, как срок службы изгибаемого элемента меняется в зависимости от конструктивных особенностей сечения на примере ригелей P1 и P2. Для рассматриваемых конструкций при усредненном значении $\varphi = 53\%$ базовый срок службы составляет 91 год для P1 и 93 года

для P2. Изменение срока службы конструкций при варьировании параметрами сечения показано в таблице 2.

Таблица 2 – Управление сроком службы ригелей P1 и P2 за счет изменения параметров сечения при проектировании

Изменяемый параметр	Первоначальное значение параметра	Новое значение параметра	Первоначальное значение параметра	Новое значение параметра	Новый прогнозируемый срок службы конструкции, лет		Относительное отклонение от первоначального прогноза 91 год (P1) и 93 года (P2), %	
	P1		P2		P1	P2	P1	P2
Увеличение площади растянутой арматуры, см ²	16,08	18,47	24,63	-	111	-	+22,0	-
Увеличение площади сжатой арматуры, см ²	1,57	2,26	1,57	2,26	99	93	+8,7	0
Увеличение класса растянутой арматуры	A400	A500	A400	A500	112	94	+23,1	+1,1
Увеличение класса бетона (вариант 1)	B30	B35	B30	B35	105	106	+15,4	+14,0
Увеличение класса бетона (вариант 2)	B30	B40	B30	B40	114	119	+25,3	+28,0
Увеличение ширины поперечного сечения, см	20	25	20	25	111	114	+22,0	+22,6

Проведен анализ влияния изменения влажностного режима эксплуатации на срок службы изгибаемого элемента. При снижении относительной влажности с 60 до 30 % за 30 лет прогнозируемый срок службы уменьшается на 5,32 % (табл. 3).

Таблица 3 – Прогнозируемый срок службы ригеля P1 при условии неизменной влажности $\varphi = 30\%$ на дальнейший период эксплуатации

Срок эксплуатации, лет	Относительная влажность в помещении с учетом прогноза φ , %	Усредненное значение относительной влажности $\varphi_{current}$, %	Прогнозируемый срок службы, годы	Относительное отклонение прогнозируемого срока службы от изначального, %
10	60	60,0	94	-
20	50	55,0	92	-2,13
30	30	46,7	89	-5,32
40	30	42,5	87	-7,45
50	30	40,0	86	-8,51
60	30	38,3	86	-8,51
70	30	37,1	85	-9,57
80	30	36,3	85	-9,57

Если при дальнейшей эксплуатации до конца жизненного цикла объекта капитального строительства влажностные условия эксплуатации

не изменятся, то срок службы объекта по сравнению с начальным этапом эксплуатации снизится на 9,57 %. При выполнении рекомендаций по поддержанию относительной влажности воздуха на уровне 50–55 % срок службы увеличивается на 5,88 % по сравнению с вариантом без корректировки (табл. 4).

Таблица 4 – Прогнозируемый срок службы ригеля Р1 с учетом рекомендаций по улучшению влажностных условий до $\varphi = 50-55\%$ на дальнейший период эксплуатации

Срок эксплуатации, лет	Относительная влажность в помещении при обследовании φ , %	Усредненное значение относительной влажности за предыдущий период $\varphi_{current}$, %	Прогнозируемый срок службы без учета рекомендаций, годы	Прогнозируемый срок службы с учетом рекомендаций, годы	Относительное отклонение, %
10	60	60,0	94	94	-
20	50	55,0	92	92	-
30	30	46,7	89	89	-
40	50	47,5	87	89	+2,30
50	55	49,0	86	90	+4,65
60	55	50,0	86	90	+4,65
70	50	50,0	85	90	+5,88
80	50	50,0	85	90	+5,88
90	55	50,6	-	90	-

В таблице 5 показана эффективность применения разработанного механизма принятия управленческих решений.

Таблица 5 – Эффективность применения разработанного механизма принятия управленческих решений

Критерий	Увеличение продолжительности жизненного цикла гражданских зданий со сборным железобетонным каркасом, %	Примечания
Управление сроком службы несущих конструкций, исходя из влажностных условий эксплуатации на стадии проектирования	до 11	С учетом требований к влажностному режиму помещений для длительного пребывания людей
Управление сроком службы несущих конструкций, исходя из характеристик сечения несущих конструкций на стадии проектирования	до 30	С учетом конструктивных особенностей элемента
Управление сроком службы несущих конструкций, исходя из влажностных условий эксплуатации, на стадии эксплуатации	до 10	Возможность применения для уже построенных объектов строительства

На рисунке 8 представлена дизайн-схема управления жизненным циклом объектов капитального строительства на основе нейросетевого прогнозирования.

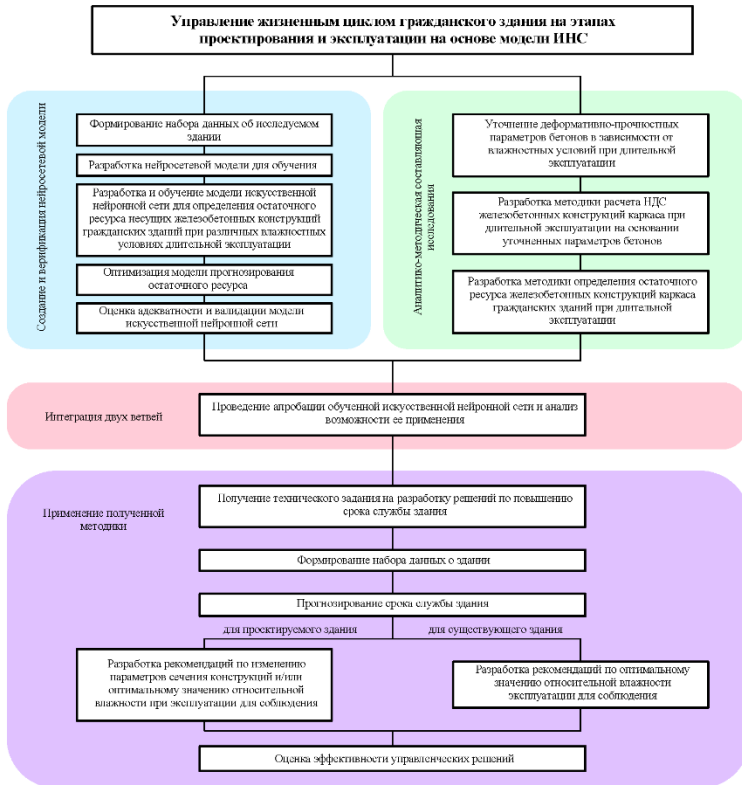


Рисунок 8 – Дизайн-схема управления жизненным циклом гражданского здания нейросетевым прогнозированием остаточного ресурса несущих конструкций

Системообразующим элементом дизайн-схемы является головной блок, формулирующий управление жизненным циклом гражданского здания на этапе проектирования и эксплуатации на основе модели искусственной нейронной сети. Левая ветвь схемы описывает последовательность этапов создания и верификации нейросетевой модели, правая ветвь схемы раскрывает аналитико-методическую составляющую исследования. Оба контура объединяются в интеграционном блоке, предусматривающем апробацию обученной искусственной нейронной

сети и проведение анализа возможности ее применения в практике проектирования, после чего схема переходит к механизму применения полученной методики.

Графическая интерпретация механизма управления жизненным циклом гражданских зданий с железобетонным каркасом с учетом влажностных условий для этапа эксплуатации представлена на рисунке 9. Механизм управления для этапа проектирования аналогичен и включает в себя также возможность варьирования параметрами сечения несущих конструкций.

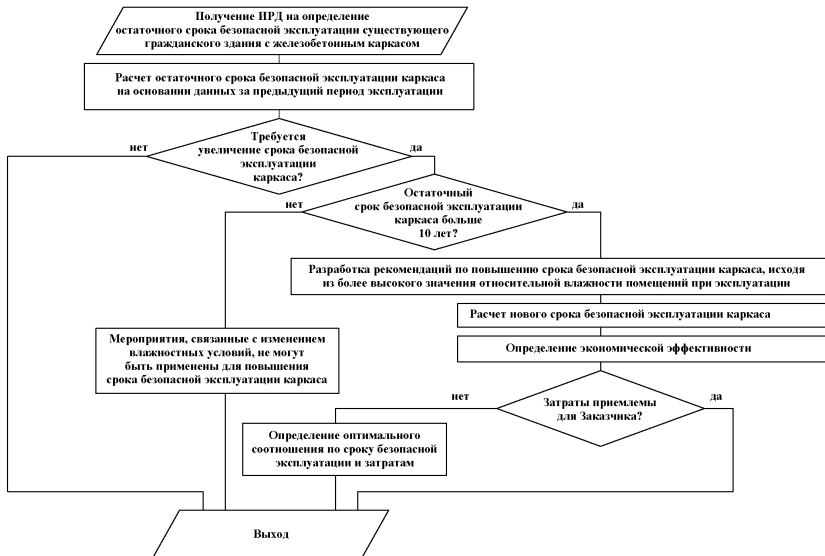


Рисунок 9 – Графическая интерпретация механизма управления жизненным циклом гражданских зданий с железобетонным каркасом с учетом влажностных условий для этапа эксплуатации

Результаты исследований апробированы в производственных условиях: на предприятии ООО «Центрогипроруда» (Белгород) при разработке проекта реконструкции административно-бытового корпуса Михайловского ГОКа им. А. В. Варичева в г. Железногорск с прогнозированием срока службы объекта и на предприятии ООО «ЭКОМИР ЖБК-1» (Белгород) с разработкой рекомендаций по повышению срока службы железобетонных конструкций.

Для проектируемого здания школы в г. Самара, на основании критерияльного подхода произведен расчет остаточного ресурса, исходя из ре-

комендаций по эксплуатации объекта с усредненным значением относительной влажности воздуха 55 % и увеличением класса бетона до В35. Экономическая целесообразность была обоснована и составила 13,38 %.

В результате проведенных исследований разработана научно-обоснованная методика анализа и количественной оценки работы несущих конструкций гражданских зданий с железобетонным каркасом с учетом влажностных условий его эксплуатации, обеспечивающей рациональное управление их жизненным циклом на основании прогнозируемых нейросетью сроков исчерпания прочности и деформативности железобетонных элементов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования. Дополнены теоретические представления о возможности применения искусственной нейронной сети для прогнозирования остаточного ресурса несущих железобетонных конструкций каркасных гражданских зданий с учетом влажностных условий их эксплуатации.

Обосновано и экспериментально подтверждено организационно-техническое решение, заключающееся в совершенствовании механизмов управления жизненным циклом объектов капитального строительства с разработкой модели искусственной нейронной сети для прогнозирования сроков исчерпания несущей способности несущих железобетонных конструкций каркасных гражданских зданий с учетом влажностных условий их эксплуатации.

Разработана методика прогнозирования деформативно-прочностных свойств бетона несущих железобетонных конструкций с учетом влажностных условий для оценки параметров их напряженно-деформированного состояния в различные периоды длительной эксплуатации с определением остаточного ресурса.

Разработана модель искусственной нейронной сети для оценки и прогнозирования остаточного ресурса объекта капитального строительства с учетом влажностных условий его эксплуатации и предложен механизм оптимизации модели посредством оценки влияния ее архитектуры на время обучения и точность прогноза.

Разработаны научно-теоретические основы технологии управления жизненным циклом гражданских зданий с железобетонным каркасом, базирующиеся на нейросетевом прогнозировании значений остаточного ресурса несущих конструкций с учетом влажностных условий их эксплуатации и предложении на его основе рациональных технических решений по увеличению срока безопасной эксплуатации объектов капитального строительства.

Обоснованы параметры предельных сопротивлений и деформаций бетона при его неоднородном сжатии и растяжении для трех граничных

случаев влажностных условий эксплуатации железобетонных конструкций в составе каркасных гражданских зданий.

Разработана методика определения напряженно-деформированного состояния изгибаемых и внецентренно сжатых несущих железобетонных конструкций каркасных гражданских зданий в различные периоды их эксплуатации с учетом влажностных условий.

Предложен механизм принятия управленческих решений для гражданских зданий с железобетонным каркасом, способствующий увеличению срока безопасной эксплуатации до 30 % на этапе проектирования и до 10 % на этапе эксплуатации на основе использования методики определения параметров напряженно-деформированного состояния несущих железобетонных конструкций при длительных нагрузках в зависимости от влажностных условий окружающего воздуха в помещениях.

Теоретические и экспериментальные положения диссертационной работы могут быть **рекомендованы** для внедрения в практику деятельности проектных организаций, строительных и эксплуатационных компаний, а также могут быть использованы в учебном процессе при подготовке бакалавров, магистрантов по направлению «Строительство» и аспирантов по научной специальности 2.1.14 «Управление жизненным циклом объектов строительства».

Перспективы дальнейших исследований: целесообразно продолжить исследования в направлении разработки и обучения модели искусственной нейронной сети с учетом более обширного набора данных, включающих расчет остаточного ресурса применительно к разным видам поперечных сечений железобетонных элементов, в том числе таврового, двутаврового, трапециевидного, разных видов железобетонных конструкций с точки зрения технологического исполнения – для монолитных и сборно-монолитных конструкций, а также для конструкций с предварительно напряженной арматурой.

СПИСОК НАУЧНЫХ ТРУДОВ, В КОТОРЫХ ИЗЛОЖЕНЫ ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Статьи в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК РФ

1. *Никулина, Ю. А.* Определение деформативно-прочностных характеристик бетонов с учетом различных влажностных условий на завершающем этапе эксплуатации зданий непромышленного назначения с железобетонным каркасом / Ю. А. Никулина, Л. А. Сулейманова // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2025. – № 8. – С. 8-19. – DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-8-8-19 (K1)

2. Сулейманова, Л. А. Оптимизация архитектуры искусственной нейронной сети при управлении жизненным циклом объекта капитального строительства на этапе эксплуатации / Л. А. Сулейманова, И. С. Рябчевский, Ю. А. Никулина, Д. Се // Перспективы науки. – 2025. – № 12(195). – С. 136-141. (К3)

3. Никулина, Ю. А. Повышение эффективности управления жизненным циклом объекта капитального строительства / Ю. А. Никулина // Вестник Евразийской науки. – 2024. – Т. 16. – № 6. – URL: <https://esj.today/PDF/30SAVN624.pdf>. (К2)

4. Никулина, Ю. А. Проблемно-ориентированный подход к цифровой трансформации систем управления жизненным циклом объектов капитального строительства / Ю. А. Никулина // Вестник Евразийской науки. – 2023. – Т. 15. – № 5. – URL: <https://esj.today/PDF/07SAVN523.pdf>. (К2)

5. Никулина, Ю. А. Определение трещиностойкости предварительно напряженных железобетонных балок трапециевидного поперечного сечения / Ю. А. Никулина // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2021. – № 11. – С. 41-48. – DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-11-41-48.

6. Кочерженко, В. В. Методика расчета прогибов в изгибаемых железобетонных элементах прямоугольного сечения на любом этапе их нагружения / В. В. Кочерженко, Ю. А. Никулина // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2016. – № 6. – С. 68-75.

В сборниках конференций

7. Никулина, Ю. А. Исследование железобетонных изгибаемых элементов для управления жизненным циклом объекта строительства / Ю. А. Никулина, Л. А. Сулейманова // Региональный строительный комплекс: проблемы и перспективы: Сборник материалов II Международной научно-практической конференции, посвященной 85-летию профессора З. М. Хаданова. – Владикавказ: Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет). – 2026. – С. 107-112.

8. Никулина, Ю. А. О влиянии влажностных условий на характеристики бетонов на завершающем этапе эксплуатации объекта капитального строительства при управлении его жизненным циклом / Ю. А. Никулина, Л. А. Сулейманова // Наука и инновации в строительстве: Сборник докладов IX Международной научно-практической конференции. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2025. – С. 163-167.

9. Никулина, Ю. А. Классификатор строительной информации как важный аспект формирования информационной модели объекта капитального строительства на всем протяжении его жизненного цикла / Ю. А. Никулина // Наука и инновации в строительстве: Сборник докладов VIII Международной научно-практической конференции,

посвященной 70-летию со дня образования БГТУ им. В. Г. Шухова. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2024. – С. 214-218.

10. **Никулина, Ю. А.** Факторы, оказывающие влияние на эффективность системы управления объектом капитального строительства на всех этапах его жизненного цикла / Ю. А. Никулина // Наука и инновации в строительстве: Сборник докладов VII Международной научно-практической конференции, посвященной 170-летию В.Г. Шухова. – Белгород: изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2023. – Т. 1. – С. 237-240.

11. **Никулина, Ю. А.** Проектно-ориентированный подход в управлении жизненным циклом объекта капитального строительства / Ю. А. Никулина // Архитектура. Строительство. Информационные технологии – 2023 (АСИТ–2023): Труды I международной научно-практической конференции. – Новороссийск: БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2023 – С. 27-29.

12. **Никулина, Ю. А.** Определение трещиностойкости изгибаемых железобетонных элементов на основе применения деформационной расчетной модели сечений / Ю. А. Никулина // Молодежь и научно-технический прогресс: Сборник трудов IX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 4-х томах. – Губкин: Изд-во ООО «Ассистент плюс». – 2016. – Т. 3. – С. 91-94.

Объекты интеллектуальной собственности

13. **Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025683583.** Определение прочностных параметров бетонов на завершающем этапе эксплуатации зданий при длительных нагрузках в зависимости от влажностных условий / **Ю. А. Никулина**, Л. А. Сулейманова, А. И. Никулин, О. Н. Шарапов. Правообладатель: ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова». Оpubл. 04.09.2025.

14. **Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020616406.** Расчет прочности и трещиностойкости предварительно напряженных железобетонных балок прямоугольного поперечного сечения / **Ю. А. Никулина**, А. И. Никулин. Правообладатель: ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова». Оpubл. 17.06.2020.

15. Способ определения прочностных параметров бетонов при длительных нагрузках в зависимости от влажностных условий: ноу-хау № 20260004 ФГБОУ ВО БГТУ им. В.Г. Шухова / Л. А. Сулейманова, **Ю. А. Никулина**, А. И. Никулин, О. Н. Шарапов, И. С. Рябчевский. зарегистрирован 12.03.2026 г.

НИКУЛИНА ЮЛИЯ АЛЕКСАНДРОВНА

**УПРАВЛЕНИЕ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ГРАЖДАНСКИХ
ЗДАНИЙ С ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫМ КАРКАСОМ С УЧЕТОМ
ВЛАЖНОСТНЫХ УСЛОВИЙ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

2.1.14. Управление жизненным циклом объектов строительства

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 30.04.2026. Формат 60×84/16.
Усл. печ. л. 1,5. Тираж 100 экз. Заказ 55.

Отпечатано в Белгородском государственном технологическом
университете им. В.Г. Шухова
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46