

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ им. В.Г. ШУХОВА»**

На правах рукописи



НИКУЛИНА ЮЛИЯ АЛЕКСАНДРОВНА

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

**Специальность 2.1.14. Управление жизненным циклом
объектов строительства**

**Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

**Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Сулейманова Людмила Александровна**

Белгород 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА	14
1.1. Современные подходы к управлению жизненным циклом объектов капитального строительства	14
1.2. Условия эксплуатации, оказывающие влияние на продолжительность жизненного цикла объектов капитального строительства и оптимизацию связанных с ними управленческих решений	35
1.3. Существующие методики определения продолжительности жизненного цикла объектов капитального строительства различного назначения	39
1.4. Аналитический обзор исследований о необходимости учета влияния длительного воздействия влажностных условий на деформативно-прочностные характеристики бетона при сжатии и растяжении	44
1.5. Выводы по первой главе	46
2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ	48
2.1. Постановка цели и задач исследования	48
2.2. Разработка структуры модели искусственной нейронной сети	50
2.3. Разработка модели искусственной нейронной сети.....	52
2.3.1. Формирование структуры обучающего датасета	52
2.3.2. Разработка структуры модели искусственной нейронной сети .	53
2.4. Выводы по второй главе.....	57
3. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СРОКОВ БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ НЕСУЩИХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ КАРКАСНЫХ ГРАЖДАНСКИХ ЗДАНИЙ С УЧЕТОМ РАЗЛИЧНЫХ ВЛАЖНОСТНЫХ УСЛОВИЙ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ.....	59

3.1. Параметры диаграмм центрального и неоднородного сжатия бетона железобетонных конструкций с учетом различных влажностных условий окружающей среды при их длительной эксплуатации	60
3.1.1. Гипотезы и допущения для получения диаграмм деформирования бетона при кратковременном и длительном неоднородном сжатии	62
3.1.2. Энергетический подход к трансформированию диаграмм деформирования бетона из центрального кратковременного сжатия в режим неоднородного сжатия	63
3.1.3. Трансформирование диаграмм неоднородного сжатия бетона из состояния кратковременного деформирования в режим длительного нагружения	66
3.2. Параметры диаграмм центрального и неоднородного растяжения бетона железобетонных конструкций с учетом различных влажностных условий окружающей среды при его длительной эксплуатации	71
3.3. Определение параметров напряженно-деформированного состояния длительно эксплуатируемых железобетонных конструкций в составе каркасных гражданских зданий в заданный момент времени с учетом различных влажностных условий окружающей среды.....	76
3.3.1. Определение деформативно-прочностных характеристик бетона при неоднородном сжатии в заданный момент времени эксплуатации соответствующей железобетонной конструкции с учетом различных влажностных условий окружающей среды .	76
3.3.2. Определение деформативно-прочностных характеристик бетона при неоднородном растяжении в заданный момент времени эксплуатации соответствующей железобетонной конструкции с учетом различных влажностных условий окружающей среды.....	86

3.3.3. Особенности определения параметров напряженно-деформированного состояния изгибаемых и внецентренно сжатых железобетонных конструкций в заданный момент времени их длительной эксплуатации с учетом влажностных условий окружающей среды	93
3.4. Выводы по третьей главе	112
4. РАЗРАБОТКА И ОБУЧЕНИЕ МОДЕЛИ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ	114
4.1. Формирование датасета для обучения модели искусственной нейронной сети	114
4.2. Оптимизация архитектуры искусственной нейронной сети	118
4.3. Обучение модели искусственной нейронной сети.....	121
4.4. Оценка валидации разработанной модели искусственной нейронной сети	127
4.5. Выводы по четвертой главе	129
5. РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО УПРАВЛЕНИЮ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ОБЪЕКТОВ КАПИТАЛЬНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА С УЧЕТОМ ИХ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ, УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ И ОПТИМАЛЬНОГО СРОКА СЛУЖБЫ.....	131
5.1. Разработка механизма принятия управленческих решений на этапе проектирования объекта капитального строительства	131
5.1.1. Получение и интерпретация прогнозных значений остаточного ресурса объекта капитального строительства.....	131
5.1.2. Оценка экономической эффективности принятия управленческих решений	134
5.2. Апробация результатов исследований	147
5.3. Выводы по пятой главе	151
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	153
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	155
П Р И Л О Ж Е Н И Я	178

Приложение А. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2025683583	179
Приложение Б. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020616404	180
Приложение В. Свидетельство о регистрации ноу-хау №20260004	181
Приложение Г. Фрагмент обучающего датасета, собранного на основе данных о здании школы в г. Белгород за 50 лет.....	182
Приложение Д. Акт о внедрении результатов диссертационной работы предприятия Общество с ограниченной ответственностью «ЦЕНТРОГИПРОРУДА»	188
Приложение Е. Акт о внедрении результатов диссертационной работы предприятия Общество с ограниченной ответственностью «ЭКОМИР ЖБК-1».....	189
Приложение Ж. Справка о внедрении результатов работы в учебный процесс.....	191
Приложение И. Графическая интерпретация механизма управления жизненным циклом гражданских зданий с железобетонным каркасом с учетом влажностных условий их эксплуатации	192

ВВЕДЕНИЕ

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 исчерпания 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 «Центрогипроруда» (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 «Центрогипроруда» (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.

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Управление жизненным циклом объекта строительства является сложным, многогранным процессом, в том числе и в силу существенных специфических отличий строительных объектов от продукции других отраслей экономики. Специфической особенностью управления объектом строительства является то, что оно осуществляется в течение длительного по времени периода, начиная с момента его создания и заканчивая ликвидацией, с учетом его отличительных характеристик, множества различных участников, с необходимостью учета влияния на технические решения нормативно-правового регулирования [1, 2] и ресурсных ограничений [3], а также условий эксплуатации, в связи с чем Федеральным законом от 30 декабря 2009 г. № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» [4] было законодательно закреплено понятие жизненного цикла здания или сооружения.

Современные реалии диктуют необходимость постоянного совершенствования механизма и инструментария принятия различных решений в области управления жизненным циклом объекта капитального строительства с целью повышения эффективности его функционирования на всех этапах.

1.1. Современные подходы к управлению жизненным циклом объектов капитального строительства

В соответствии с Федеральным законом от 30 декабря 2009 г. № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» [4] жизненный цикл объекта капитального строительства включает в себя инженерные изыскания, проектирование, строительство, эксплуатацию, реконструкцию, капитальные ремонты, его снос. В дальнейшем, указанные выше элементы жизненного цикла по однородным признакам объединяются в следующие стадии: инвестиционную, эксплуатационную и ликвидационную.

Концептуально, управление жизненным циклом объекта капитального строительства – это создание объекта, внесение в него изменений для достижения

оптимальности функционирования на протяжении всего жизненного цикла, а также принятие своевременного и обоснованного решения о его завершении.

Исследование и анализ факторов, оказывающих влияние на эффективность управления жизненным циклом объекта капитального строительства, показали, что следует рассматривать еще одну стадию – прединвестиционную, которая как отдельный элемент в указанном перечне отсутствует. Результаты решений, принятых на прединвестиционном этапе, являются основой и исходной точкой для последующих процессов.

Именно в рамках аналитической и исследовательской деятельности на прединвестиционной стадии появляется идея создания объекта [5-7], определяются цели функционирования, формируется инвестиционный замысел, рассматриваются альтернативные варианты и из их множества выбирается самый приемлемый для будущего инвестора по установленным им критериям. Через будущий образ и макетирование начинается его визуализация, а также определяются источники финансирования [8]. С точки зрения сущности этапов жизненного цикла объекта капитального строительства, его концептуальные технические и экономические решения предшествуют детальной проработке и внедрению на последующих этапах жизненного цикла.

Следует также отметить как важнейший фактор выделения прединвестиционной стадии в отдельный блок то обстоятельство, что решение о создании объекта может быть не принято или оно будет перенесено на какой-то срок исходя из тех реалий, которые делают невозможным или затруднительным реализацию задуманного.

На рисунке 1.1 схематично обозначены этапы жизненного цикла объекта строительства, на которых должна быть сосредоточена, скоординирована и сфокусирована вся совокупность управленческих воздействий на объект капитального строительства для достижения означенной цели.

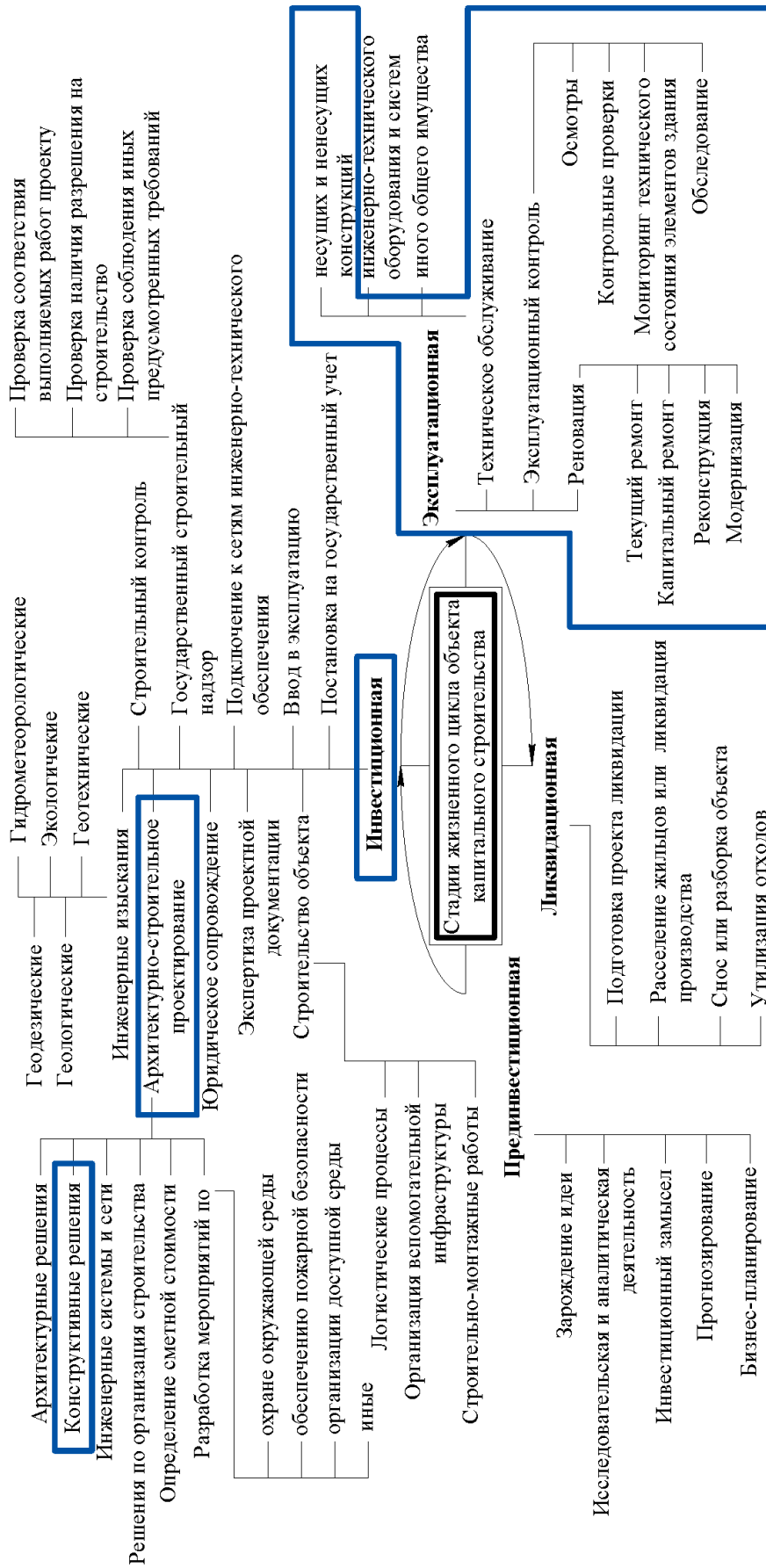


Рисунок 1.1 – Стадии жизненного цикла объекта строительства

Этапы жизненного цикла объекта капитального строительства с соотношением финансовых затрат схематично представлены на рисунке 1.2 [9].

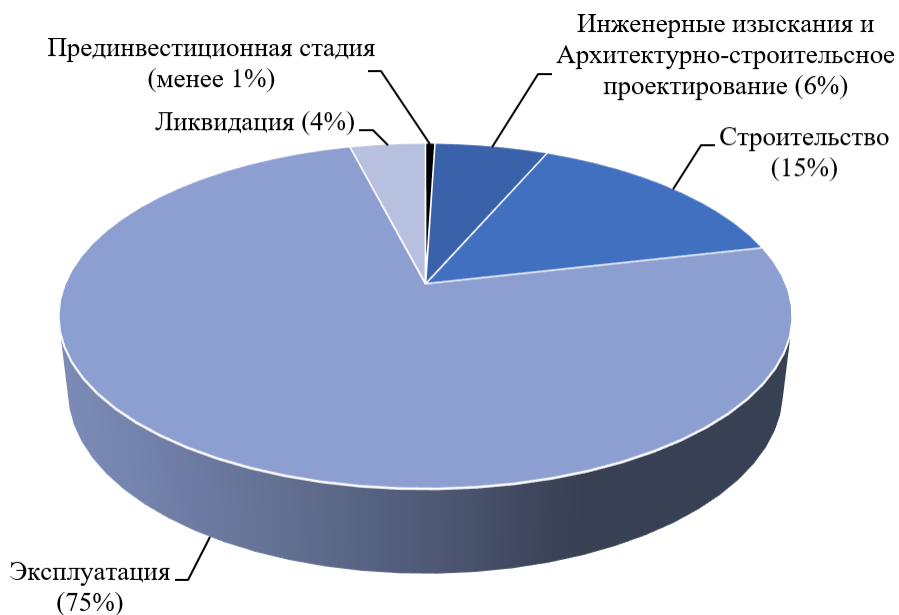


Рисунок 1.2 – Стоимость затрат на разных этапах жизненного цикла объекта строительства

Что касается стоимости прединвестиционной стадии, то она может быть затратной, а может не требовать значительных ресурсов на исследования и выполняться в рамках операционной деятельности инвестора. Но в целом, она оказывает стратегическое влияние на управление жизненным циклом объекта капитального строительства в случае принятия управленческого решения о реализации идеи.

Прединвестиционная стадия дает начало стадии инвестиционной, на которой непосредственно создается объект строительства, являющийся результатом деятельности строительного комплекса. Управление стадией эксплуатации объектов капитального строительства является важнейшей функцией деятельности жилищно-коммунального комплекса и реализуемыми им в этой связи задачами. Стратегической целью при этом являются интеграционные процессы с другими отраслями экономики и, особенно со строительным комплексом, по созданию благоприятной среды обитания человека и, что очень важно, постоянное повышение ее уровня по достижению растущих качественных характеристик. Это требует системного подхода к постоянному поиску инновационных управленческих решений, связанных с реализацией

многочисленных задач на всех уровнях управления как в строительном, так и в жилищно-коммунальном комплексах. При этом необходимо отметить следующие важнейшие аспекты [10]:

- необходимость совершенствования механизма повышения научно-технического потенциала через наращивание объема передовых научно-технологических разработок, патентов, изобретений, ноу-хау и их внедрение;
- подготовка и насыщение в достаточном количестве рынка труда высококвалифицированными специалистами в указанных областях профессиональной деятельности;
- осуществление цифровой трансформации всех направлений профессиональной деятельности и др.

Строительный и жилищно-коммунальный комплексы для успешного решения современных задач по обеспечению высоких стандартов качества своей деятельности по управлению жизненным циклом объектов капитального строительства должны следовать в направлении инновационного вектора развития, добиваясь эффективных результатов.

Схематично влияние основных стадий (включая прединвестиционную) жизненного цикла на эффективность функционирования объекта капитального строительства продемонстрировано на рисунке 1.3. С точки зрения эффективного функционирования объекта капитального строительства и достижения запланированных результатов требуется применение сложной многогранной и многоуровневой системы управления. Содержание и понятие управления жизненным циклом объекта капитального строительства по этой причине следует в целом рассматривать в нескольких направлениях:

- как науку управления (потому что оно должно базироваться на теоретических положениях и фундаментальных аспектах управления);
- как вид профессиональной деятельности (включающую процессы формирования и принятия управленческих решений относительно продолжительности жизненного цикла и его наполненности);
- как аппарат (имеется в виду наличие иерархической структуры, состоящей из специализированных органов управления, института специалистов различных уровней, которые являются субъектами управления, наделенными различными

полномочиями в принятии и реализации управленческих решений и обладающими определенной ответственностью за результаты жизненного цикла, действия которых позволяют создавать объект капитального строительства и функционировать с учетом его специфических особенностей).

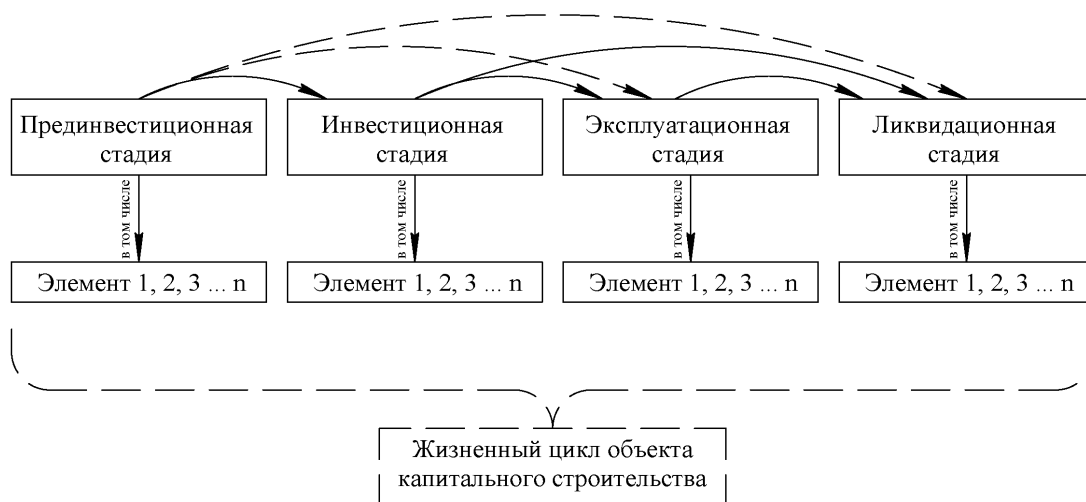


Рисунок 1.3 – Влияние управления основными стадиями жизненного цикла на эффективность функционирования объекта капитального строительства:
1, 2, 3...n – процессы, входящие в стадии жизненного цикла

Управлению жизненным циклом объекта капитального строительства присущи общеизвестные функции, а также разнообразные и многочисленные процессы и инструментарий с учетом его специфических особенностей. При этом следует учесть, что все перечисленные элементы системы многократно повторяются на протяжении всего жизненного цикла. Основные из них представлены на рисунке 1.4.

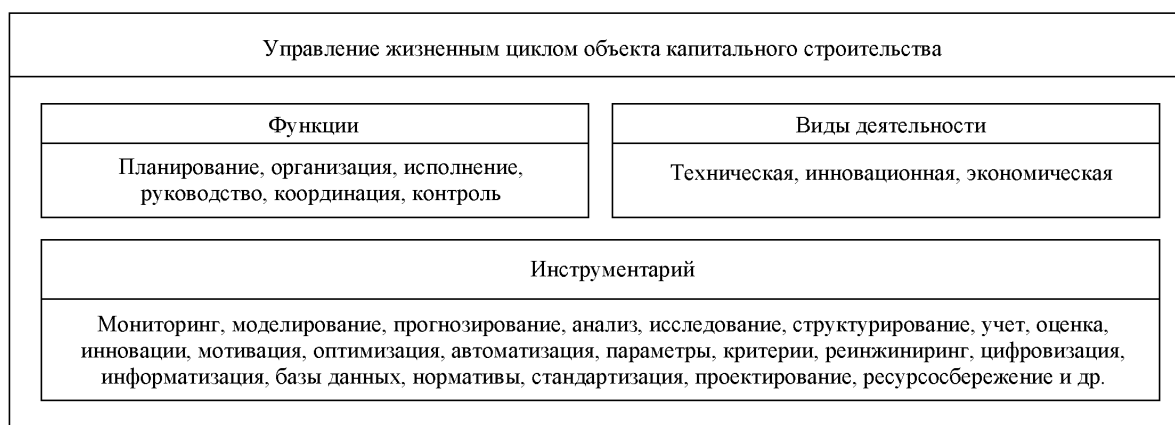


Рисунок 1.4 – Основные функции, виды деятельности и инструментарий при управлении жизненным циклом объекта капитального строительства

В случае реализации всего вышеперечисленного, поставленные задачи могут считаться решенными, стратегическая цель – достигнутой и управление жизненным циклом объекта капитального строительства в целом можно считать успешно выполненным.

В современной теории и практике управления используются множество подходов. Среди них можно выделить основные и которые в той или иной степени применимы и используются при управлении жизненным циклом объектов капитального строительства – это научный, инновационный, системный, ситуационный, проблемно-ориентированный, проектный, критериальный, цифровая трансформация и др.

Научный подход предполагает получать, систематизировать и обобщать фундаментальные знания; исследовать и структурировать явления; выдвигать перед началом выполнения работы гипотезы, которые позволяют задать четкие рамки направлений и конкретных аспектов, позволяя оптимизировать ресурсы и усилия; проводить эксперименты и другое [11, 12]. Главное условие при этом – соблюдать принципы, присущие научному подходу: объективность и возможность повторения.

Стратегически устойчивое прохождение всех этапов жизненного цикла как новых, так и уже функционирующих объектов капитального строительства, невозможно без непрерывного использования результатов научной, научно-технической, нововведенческой деятельности. В основе организации этой деятельности лежат инновационные процессы, цель которых реализовать результаты научных исследований, превратить изобретения и новые разработки в проекты трансформации новых знаний в техническую практику: в передовую технику, технологии или отдельные их звенья, новые услуги, квалификацию, навыки, организационно-управленческие приемы. В этом заключается сущность *инновационного подхода* [13-15].

На создание, эксплуатацию и стратегию развития объекта капитального строительства оказывают влияние технические, нормативно-правовые и экономические факторы. С целью повышения эффективности управления

жизненным циклом объекта капитального строительства логично рассматривать его как единую систему, центральным элементом которой является сам объект в тесной привязке к внутренней и внешней среде [16, 17]. В этом заключается необходимость использования *системного подхода* [18-23].

Например, нормативно-правовое регулирование влияет на все процессы жизненного цикла в целом и детально на отдельные его этапы. К ним относятся полнота и качество законодательства, регулирующего данную сферу, наличие и своевременное совершенствование нормативных документов, оптимальный контроль процессов, происходящих на всех этапах, включая возможность необходимого и достаточного мониторинга технического состояния конструкций и инженерного оборудования на этапе эксплуатации, перечень требований для его проведения по обеспечению безопасности.

Что касается экономических аспектов, то среди основных можно перечислить:

- стратегии развития населенных пунктов и их типы, зонирование территории, наличие федеральных и региональных программ, направленных на развитие территорий, необходимость в строительстве объектов, их характеристики;

- количество и качество подготовленных специалистов, с учетом развития того или иного направления или в нескольких направлениях одновременно, которое может требовать увеличения количества специалистов и уровня их подготовки, а также появления новых профессий и специальностей;

- качество и совершенствование конкурентной среды в области строительства и жилищно-коммунального сектора, а также в других секторах экономики государства;

- инвестиционный климат на макро-, мезоуровнях управления, также инвестиционные возможности и инновационная культура бизнес-сообщества и населения, создающего и эксплуатирующего объекты капитального строительства;

- прибыльность создания и эксплуатации потенциального объекта капитального строительства, объективная оценка его финансовой привлекательности и заинтересованность в нем потребителя;

- надежность логистических цепочек на всех этапах жизненного цикла;

- цифровая трансформация различных процессов на всех стадиях жизненного цикла объекта капитального строительства;

- риски, связанные с изменением экономической среды на макро- и мезоуровнях, коммерческие, маркетинговые, строительные, экологические, эксплуатационные, кадровые, природные, техногенные, форс-мажорные и многие другие, вследствие которых при их наличии или недостаточной проработанности управление процессами жизненного цикла объекта капитального строительства может быть серьезно затруднено или остановлено. В этой связи, следует отметить также, что на инвестиционной стадии этап строительства является наиболее капиталоемким в единицу времени, поэтому с ним сопряжено больше всего рисков – если строительство объекта по какой-то причине не будет завершено, то получать прибыль или иную пользу от его эксплуатации будет невозможно.

Незавершенное строительство обычно относят к труднореализуемым активам, и чем дольше объект будет стоять недостроенным, тем сложнее впоследствии будет найти ему применение и тем больше потребуются инвестиционных затрат на его завершение. По информации Росстата количество зданий в Российской Федерации, строительство которых было приостановлено или законсервировано, в 2020 г. составляло 8441, в 2021 г. – 8818, в 2022 г. – 7008, в 2023 г. – 6 912, в 2024 г. – 6 045, в 2025 г. – 6 098 [24]. Прослеживается тенденция к снижению количества недостроенных объектов при том, что объемы ввода в эксплуатацию новых зданий растут, как следует из таблицы 1.1 [24, 25].

На рисунках 1.5 и 1.6 наглядно продемонстрирована тенденция к увеличению введенных в эксплуатацию зданий в период 2018-2025 гг.

Следует выявлять и учитывать факторы, оказывающие существенное влияние на функционирование объекта строительства [26, 27].

Таблица 1.1 – Объемы введенных в эксплуатацию зданий в Российской Федерации в период 2018-2025 гг.

Годы	Здания жилого назначения		Другие виды зданий	
	Количество, тыс.	Общая площадь, млн м ²	Количество, тыс.	Общая площадь, млн м ²
2018	242,4	101,8	18,7	30,9
2019	285,8	111,7	19,7	35,1
2020	308,0	110,0	18,7	33,4
2021	383,4	114,4	19,7	34,0
2022	413,4	126,7	21,1	33,5
2023	445,8	139,3	19,7	35,7
2024	475,4	132,4	21,3	38,4
2025	480,0	134,5	23,1	41,5

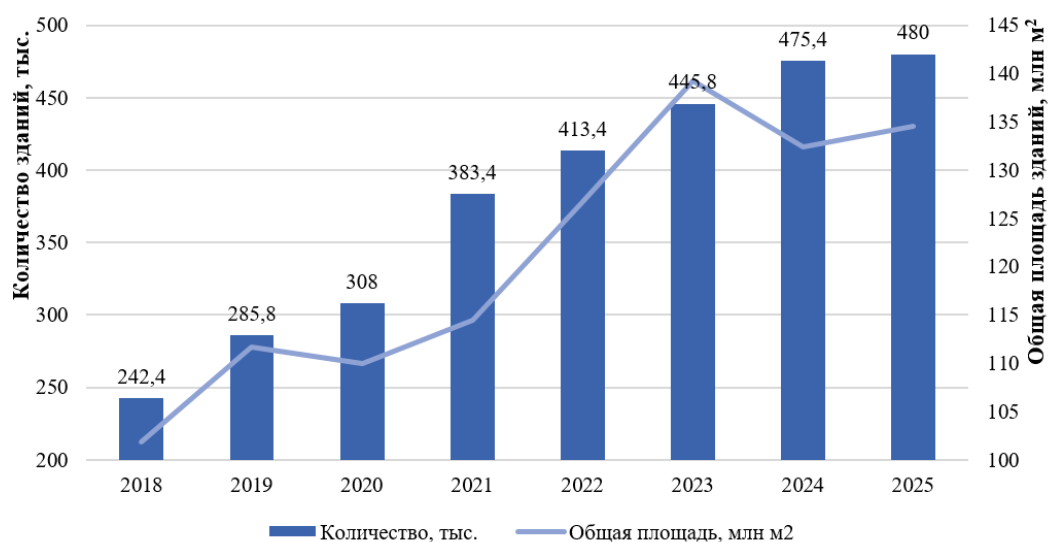


Рисунок 1.5 – Количество и общая площадь введенных в эксплуатацию зданий жилого назначения за период 2018-2025 гг.

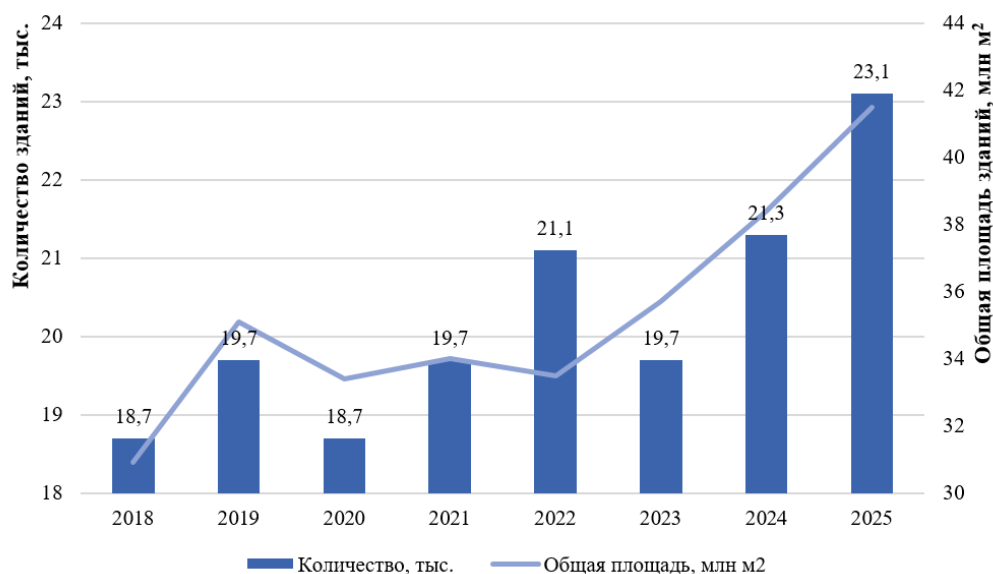


Рисунок 1.6 – Количество и общая площадь введенных в эксплуатацию зданий, за исключением жилых, за период 2018-2025 гг.

К основным техническим факторам (см. рисунок 1.7), оказывающим влияние на жизненный цикл объекта капитального строительства, можно отнести следующие:

- тип объекта, техническое задание заказчика;
- уровень сложности геологических, гидрометеорологических и иных условий на планируемой для застройки территории;
- современные технологии строительного производства;
- наличие и совершенство применяемого оборудования, уровень механизации и автоматизации процессов, возможности существующих программных продуктов и перспективы их развития;
- наличие и доступность строительных материалов, конструкций и изделий, их качественные характеристики, совершенство логистических решений;
- качество технической эксплуатации и обслуживания;
- совершенство технологий демонтажа и утилизации отходов на стадии ликвидации объекта капитального строительства;
- совершенство механизмов разработки и внедрения инноваций при создании и эксплуатации объектов капитального строительства и др.

К перечисленному следует добавить, безусловно, один из важнейших компонентов системы управления жизненным циклом объектов капитального строительства – это вовлеченность значительного количества субъектов на всех его этапах. Органы государственной власти регулируют и контролируют вопросы обеспечения безопасности и эффективности функционирования объектов капитального строительства, другие участники, перечисленные на рисунке 1.8, их создают, обслуживают и эксплуатируют.

Необходимо отметить, что отдельные участники каждого этапа жизненного цикла объекта строительства, выполняя свои производственные функции, стремятся достичь своих поставленных целей и выполняют сформулированные в их рамках задачи, которые не всегда оптимально взаимосвязаны с дальнейшими этапами, а это оказывает влияние на их протяженность и эффективность.

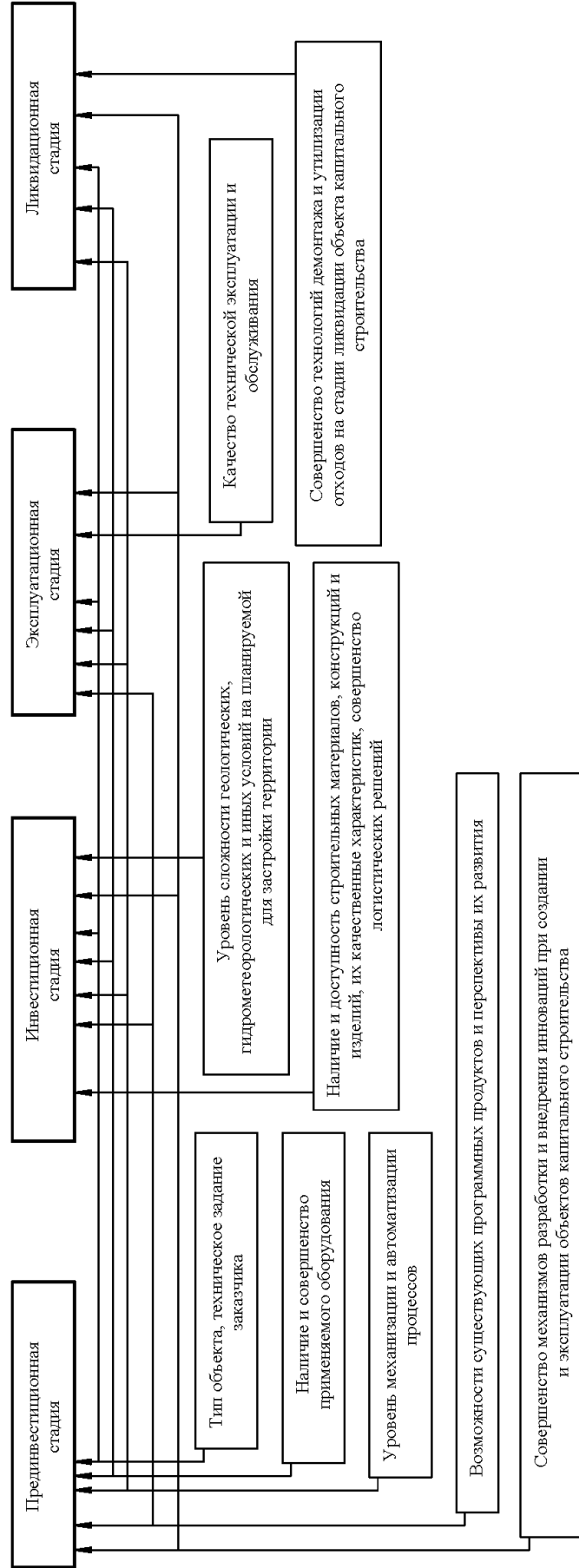


Рисунок 1.7 – Основные технические факторы, оказывающие влияние на жизненный цикл объекта капитального строительства

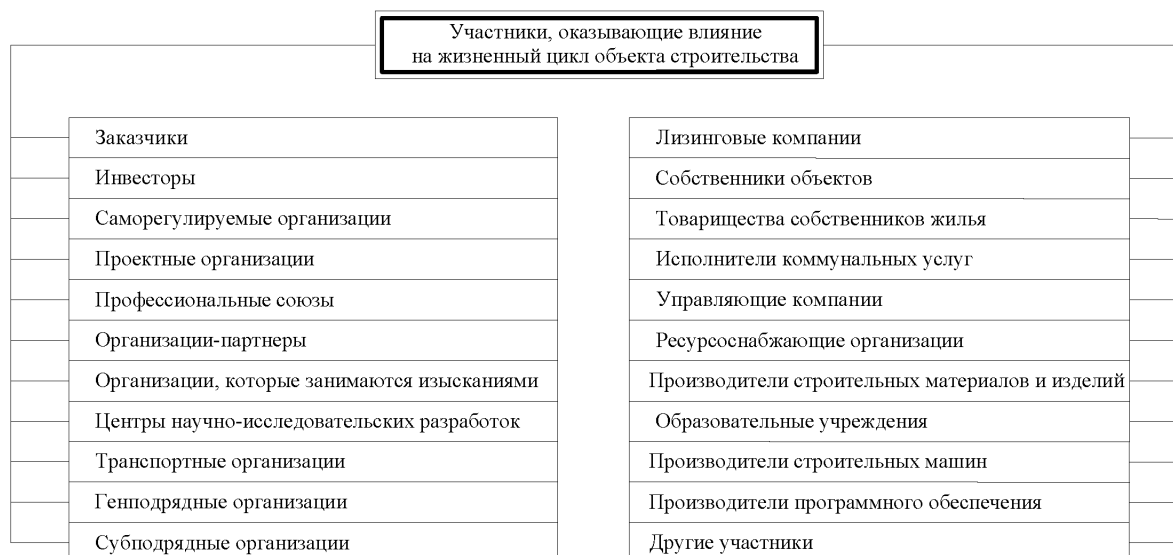


Рисунок 1.8 – Участники, оказывающие влияние на жизненный цикл объекта капитального строительства

Цель каждого из участников этапов жизненного цикла объекта строительства понятна и ясна – выполнить свою работу в рамках технического задания и существующих нормативно-правовых актов с, насколько это возможно, меньшими затратами времени и труда и большей прибылью. Однако отдельные решения предыдущего этапа могут затруднять работу участника следующего. Чтобы подобного не происходило, нужно комплексно и своевременно выявлять проблемы и предлагать отдельным участникам пути их решения. В работах [28, 29] сказано, что на этапе строительства одним из главных аспектов является сотрудничество различных специализированных организаций и подразделений для достижения общей цели. То же более глобально можно отнести к взаимодействию участников жизненного цикла объекта капитального строительства в целом, что является весьма затруднительным, поскольку на первоначальных стадиях невозможно объединить всех будущих участников.

Как было отмечено выше, перечисленные на рисунке 1.3 элементы системы повторяются многократно на протяжении длительного времени и решения принимаются многочисленными участниками управления в изменяющихся условиях внешней и внутренней среды. Достижение высокой эффективности управления таким проектом возможно через своевременное выявление настоящих и прогнозирование будущих проблем на любом временном отрезке и их влияние

на состояния объекта и его жизненный цикл в целом. Это является основой для принятия упреждающих управленческих решений или их корректировки, что заложено в сущность аналитической деятельности в рамках *проблемно-ориентированного подхода*. Данный подход уже широко зарекомендовал себя в разных сферах деятельности, в частности – в области образования [30, 31].

Эффективность *проблемно-ориентированного подхода* в сочетании с перечисленными выше современными управленческими технологиями заключается не только в своевременном выявлении уже возникающих, но и, самое главное – прогнозировании потенциальных проблем. Ведь в его основе лежит систематизированный анализ проблематики в управлении жизненным циклом объекта капитального строительства, выявление слабых мест и их успешное усиление с помощью различных мероприятий.

Проблемно-ориентированный анализ является центральным звеном указанного подхода и необходим для консолидации усилий в различных направлениях управленческой деятельности относительно объекта капитального строительства, которые направлены на преодоление проблем в ресурсосбережении, в инновационной деятельности, при цифровой трансформации процессов, всесторонней информатизации и др. Это обусловлено тем, что управленческие решения о внесении изменений в объект капитального строительства принимают, например, собственники, иногда не обладающие достаточной осведомленностью в рассматриваемой области. По этой причине необходимо совершенствовать механизм управления жизненным циклом объекта капитального строительства в части постоянной актуализации понятийного аппарата [32] и координации всех процессов по построению четкой и логически выстроенной последовательности взаимодействия ключевых субъектов со встраиванием их в информационную среду.

Как было сказано выше, управленческая деятельность должна вестись системно и комплексно и исходить из того, что мероприятие любого уровня в управлении, связанное с решением каких-либо задач или проблем – это реализация проекта по изменению его настоящего состояния и влияние на

будущее. Следовательно, высокоэффективным относительно жизненного цикла объекта капитального строительства видится проблемно-ориентированный анализ и проектное управление, которые являются ядром *проектного подхода*. С этой точки зрения проектное управление следует рассматривать как координацию процесса, состоящего из совокупности последовательных мероприятий, т.е. цепочки проектов, целью которых является внесение изменений в объект капитального строительства на всем протяжении его существования для решения возникших и прогнозируемых проблем. Система управления объектами капитального строительства на протяжении жизненного цикла состоит из управления проектами его создания и внесения изменений как составных ее элементов. Эффективная реализация проекта подразумевает последовательное (иногда параллельное) выполнение всех процессов управления проектами [33]. В целом эффективность применительно к результатам проекта – это соотношение между достигнутым результатом и использованными ресурсами [34, 35]. Можно отметить, что эффективность управления жизненным циклом объекта капитального строительства находится в прямой зависимости от своевременно принятых и качественно выполненных оптимальных проектных решений [34]. Данный подход реализуется в других сферах деятельности [33, 35], но в области управления объектом капитального строительства его реализация имеет свои особенности. При этом исходить необходимо из той предпосылки, что даже незначительные изменения – это проект, которому присущи все его атрибуты и свойства.

Что касается проектного управления, то необходимо отметить, что относительно объекта капитального строительства смысловые подходы к наполнению определения проекта многовариантны. С одной стороны, это что-то однократное, например, на прединвестиционной и инвестиционной стадиях разрабатывается детализированный проект объекта, который реализуется в виде его строительства. При сдаче объекта в эксплуатацию данный проект считается выполненным и закрывается, а сам объект переходит на следующую стадию жизненного цикла – эксплуатационную.

При этом строительная деятельность в отношении объекта не прекращается и реализуется, например, в виде ремонтов, реконструкции и других форм реновации [26, 36]. Эти проекты можно рассматривать как отдельно, так и как систематическую деятельность, которая продолжается столько, сколько требуется для достижения заданных результатов в рамках одной стратегической цели – максимально эффективное достижение оптимальности создания, функционирования и развития на протяжении всего жизненного цикла. Отсюда следует, что жизненный цикл объекта капитального строительства, состоящий из совокупности проектов, можно рассматривать как единое целое – проект, которому присущи все основные признаки характерные для содержания этого понятия [35]. Прежде всего: есть объект, точная формулировка цели его создания и функционирования, конкретизация результатов, ресурсоемкость, временные ограничения, выполнение многочисленных скоординированных действий, большое количество участников и т.д. В качестве сравнения ниже на рисунке 1.9 представлена блок-схема жизненного цикла проекта создания объекта капитального строительства, а на рисунке 1.10 – проект его жизненного цикла, где объект является центральной частью полученной системы с точки зрения проектного управления.

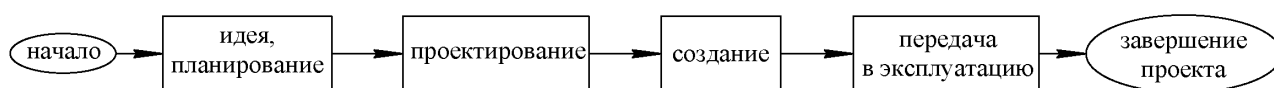


Рисунок 1.9 – Блок-схема проекта «Создание объекта капитального строительства»

Отличия между проектом создания объекта капитального строительства и проектом «Объект капитального строительства на протяжении всего жизненного цикла» несмотря на то, что речь идет об одном и том же объекте, существенные. Они заложены во временных параметрах, масштабности, целях и задачах, результатах, ресурсоемкости, количестве ключевых участников, нормативно-правовом регулировании, проблемной области, сложности планирования и прогнозирования и т.д.

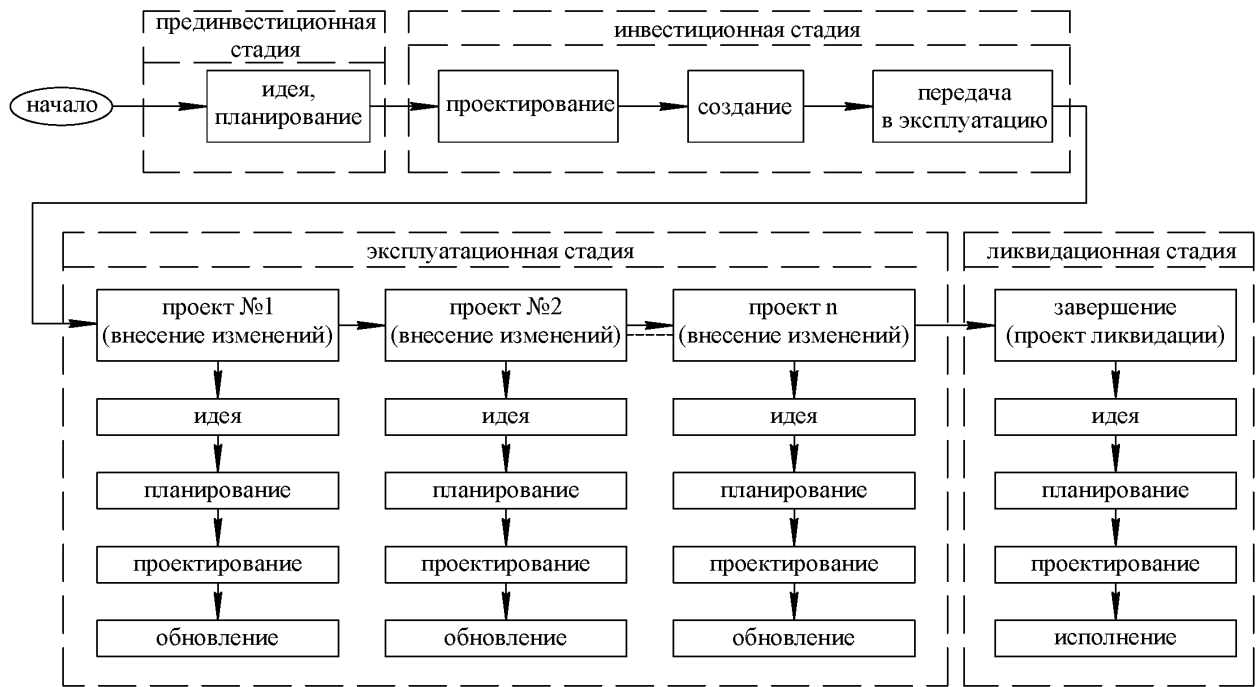


Рисунок 1.10 – Блок-схема проекта «Объект капитального строительства на протяжении всего жизненного цикла»

Одним из важнейших направлений совершенствования процесса управления жизненным циклом объекта капитального строительства является его *цифровая трансформация*. Это важнейший механизм эффективного управления жизненным циклом объекта капитального строительства включает в себя всестороннее моделирование его создания и развития, является информационной составляющей данной системы на основе цифровой интеллектуальной поддержки принятия оптимальных решений. Инструментами цифровой трансформации всех видов деятельности и на всех этапах функционирования объекта, выступают постоянная и комплексная научная, исследовательская, аналитическая и проектная деятельность в отношении совокупности достоверной информации.

Цифровая трансформация является одним из трех направлений, выделенных в Стратегии развития строительной отрасли и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации на период до 2030 года с прогнозом до 2035 года, утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 31 октября 2022 г. № 3268-р [37]. Указанные направления включают в себя также административную и профессиональную трансформацию. Что касается цифровой трансформации, целевым ориентиром ее мероприятий являются

формирование и развитие цифровой системы управления жизненным циклом объектов капитального строительства, городского и жилищно-коммунального хозяйства, отвечающей современным отраслевым вызовам, а в число задач входят:

– цифровая трансформация процессов и услуг, административных процедур в сфере строительства и жилищно-коммунального хозяйства, внедрение информационных технологий на всех этапах жизненного цикла объекта капитального строительства;

– консолидация информации о градостроительной деятельности на всей территории Российской Федерации, обеспечивающая поддержку принятия управленческих решений и широкий доступ для участников отрасли с целью минимизации транзакционных издержек взаимодействия и другие.

Информационное пространство представляет собой совокупность специализированных информационных ресурсов, созданных субъектами информационной среды с целью удовлетворения потребностей в объективных, достоверных и актуальных сведениях ключевых участников, выполняющих управляющие воздействия на объект капитального строительства на всех этапах его жизненного цикла, что необходимо для формирования информационной модели.

Результатом создания качественного, наиболее полного, систематизированного информационного пространства для управления объектом капитального строительства, является постоянное повышение необходимых знаний для более взвешенных и рациональных проектных решений [38].

При этом следует отметить, что информационное пространство формируется под влиянием информационной среды, которая включает в себя все области жизни общества и используется в различных направлениях деятельности человека. Одной из важнейших составляющих цифровой трансформации строительства являются технологии информационного моделирования. Впервые понятие «информационная модель» было закреплено официально

в Градостроительном кодексе Федеральным законом от 27 июня 2019 г. № 151-ФЗ [26, 39].

На всех этапах жизненного цикла объекта капитального строительства задействовано большое количество участников [26]. Согласно Градостроительному кодексу (ст. 57.5, п. 1) непосредственно *формирование и ведение информационной модели* обеспечивают застройщик, технический заказчик, лицо, обеспечивающее или осуществляющее подготовку обоснования инвестиций, и (или) лицо, ответственное за эксплуатацию объекта капитального строительства, в случаях, установленных Правительством Российской Федерации. Тем не менее, число участников, оказывающих влияние на эффективность функционирования объекта, гораздо больше. Цифровая трансформация строительной отрасли и ЖКХ направлена в том числе на формирование условий для более эффективного взаимодействия участников. Технологии информационного моделирования рассматриваются «не только в практической деятельности проектных и строительных организаций, но и при взаимодействии с органами власти, осуществляющими полномочия по проведению государственной экспертизы проектной документации, государственного строительного надзора, выдаче разрешений на строительство» [1].

Уже функционируют государственная информационная система «Единый государственный реестр заключений экспертизы проектной документации объектов капитального строительства» [40], автоматизированная информационная система «Реформа ЖКХ» [41] и др., также нужна и система для хранения и анализа информационных моделей объектов капитального строительства. В связи с чем Федеральным законом от 27 июня 2019 г. № 151-ФЗ было закреплено понятие «классификатор строительной информации» [26, 39]. Разработаны нормативные документы, регламентирующие работу с информационной моделью, правила организации работ производственно-техническими отделами [42], правила обмена между информационными моделями объектов и моделями, используемыми в программных комплексах [43], правила формирования информационной модели объектов на различных этапах

жизненного цикла [44], правила описания компонентов информационной модели [45] и другие аспекты.

Комплексная работа в направлении информационного моделирования активно ведется, проводится много исследований касательно особенностей внедрения данной технологии и выявления проблем при цифровой трансформации строительной отрасли в целом [46-57].

Ситуационный подход в управлении – это, казалось бы, лишь гибкие стили, методы и способы принятия решений, которые зависят от учета конкретной ситуации и внимания к множеству переменных составляющих в настоящий момент. Среди методов при данном подходе используются:

- ситуационный анализ (исследование текущей обстановки и факторов, оказывающих на нее влияние);
- матрица решений (это чаще всего табличное структурирование процесса выбора при принятии решений с группировкой по однородным признакам, классификацией по степени сложности и приоритетности «проблема – решение»);
- моделирование сценариев (прогноз влияния текущей ситуации на будущее состояние объекта исследования и планирование упреждающих воздействий для минимизации неблагоприятных последствий).

Именно перечисленные методы ситуационного подхода позволяют текущую ситуацию не только оперативно изменять в зависимости от текущих обстоятельств, но и рассматривать в качестве его компонентов необходимость прогнозировать будущее, исходя из сложившихся (иногда неожиданных) реалий настоящего времени. В качестве проблемного аспекта этого подхода необходимо отметить, что в данном случае ключевыми являются скорость и быстрота принятия управленческих решений, что усложняет процессы прогнозирования. Решение здесь видится в использовании цифровых технологий. Необходимо заранее, например, на стадии проектирования разрабатывать автоматизированные расчетные методики, что позволит компенсировать нехватку времени на сбор и обработку данных при текущем анализе.

Формализуя вышеизложенное с использованием схемы «Этапы жизненного цикла объекта строительства» [58], математическую модель эффективности управления жизненным циклом объекта капитального строительства укрупненно можно представить следующим образом:

$$\mathcal{E} = \sum_{i=1}^4 \mathcal{E}_i \rightarrow \mathcal{E}_{\max} \quad (1.1)$$

где i – индекс принадлежности к стадии жизненного цикла объекта капитального строительства, общее количество которых составляет 4; \mathcal{E}_{\max} – максимально возможный положительный результат по критерию эффективности.

Необходимо отметить, что данная формула демонстрирует теоретическую интерпретацию оценки эффективности управления жизненным циклом объекта капитального строительства для всего периода его существования. При оценочных расчетах необходимо определять качественные и количественные значения критериев и ограничений с использованием различных абсолютных и относительных показателей или интегральных коэффициентов из широкого спектра управленческого инструментария, включая факторный, функциональный анализ, сравнительный анализ инженерных решений, экспертные методы, различные расчетные методики и др. Перечисленное является основой *критериального подхода* к управлению жизненным циклом объекта капитального строительства. Критериальный подход на текущий момент широко применяется в области образования [59-63], управления предприятием [64-67], развитием регионов [68, 69], а также в области строительства с точки зрения привлекательности строительной продукции для покупателя [70].

Современные реалии по достижению стратегических целей инновационного развития и модернизации национальной экономики на всех направлениях деятельности требуют постоянного формирования актуальных стратегических инициатив и их реализации в каждом ее элементе. Необходимой основой для успешного продвижения социально-экономической системы государства в соответствии с указанным вектором развития является создание благоприятных условий для проживания граждан и формирование основных фондов,

необходимых для производственной деятельности в соответствии с самыми высокими стандартами качества [71]. Необходимо отметить, что темпы создания объектов капитального строительства в Российской Федерации высоки и существующий рынок постоянно пополняется. В этой связи, важнейшим направлением деятельности специалистов в этой области является комплексная исследовательская и аналитическая работа по совершенствованию методов построения и развития эффективных систем управления жизненным циклом объектов капитального строительства с целью выявления проблем и определения путей их эффективных решений.

В заключение необходимо отметить следующее: несмотря на различия в толковании, определении, использовании различных механизмов реализации, методов, способов и инструментария, в сущности перечисленных подходов прослеживается и их общность, взаимосвязь и взаимодополнение друг друга. Следовательно, непрерывная модернизация действующего управленческого инструментария, его комбинирование и создание на этой основе инновационных решений, является обязательным и необходимым.

1.2. Условия эксплуатации, оказывающие влияние на продолжительность жизненного цикла объектов капитального строительства и оптимизацию связанных с ними управленческих решений

Состояние и долговечность несущих конструкций каркасного здания можно сопоставить с продолжительностью жизненного цикла объекта капитального строительства в целом, с той поправкой, что жизненный цикл объекта капитального строительства может завершиться раньше, чем исчерпается ресурс несущего каркаса, в силу различных причин, среди которых можно выделить следующие [72]:

– строительство объекта не было завершено [73-75] или даже начато, в таком случае жизненный цикл объекта капитального строительства заканчивается на одном из первых этапов еще до введения объекта в эксплуатацию;

– функциональное назначение здания перестало отвечать современным требованиям, что привело к моральному износу. В таком случае целесообразна реконструкция, но если для владельца объекта это нерентабельно, то жизненный цикл объекта капитального строительства заканчивается ликвидационной стадией раньше, чем наступает момент исчерпания остаточного ресурса объекта по физическому износу и другие причины.

Однако, несмотря на причины, по которым жизненный цикл может завершиться раньше, чем предполагалось на первых этапах, после момента исчерпания каркасом здания несущей способности эксплуатация здания невозможна.

Что касается условий эксплуатации, наибольшее влияние на железобетонные конструкции оказывают:

- температурные условия;
- агрессивные воздействия реагентов, связанные с функциональным назначением здания;
- влажностные условия.

Исследования в области влияния температурно-влажностных условий эксплуатации на конструкции представляются актуальными и проводятся учеными применительно к ограждающим конструкциям из ячеистого бетона [76-78], деревянным конструкциям [79, 80] и другим материалам [81-86]. В большей степени исследования посвящены ограждающим конструкциям. Учеными также исследуется влияние различных факторов на температурно-влажностный режим помещения [87-95].

Что касается температуры окружающей среды, то высокая или низкая температура, а особенно ее перепады, оказывают негативное воздействие на арматуру. Рассмотрение высокой температуры актуально для производственных зданий с горячим производством. Воздействие низких температур характерны, в основном, для ограждающих конструкций или для фундаментов.

Исследование изменения параметров НДС несущих железобетонных конструкций каркаса в различных влажностных условиях в течение длительного периода эксплуатации представляется перспективным вопросом для изучения.

При изготовлении сборной или монолитной железобетонной конструкции высокая относительная влажность окружающей среды является основополагающим фактором для набора прочности бетона. При неблагоприятных влажностных условиях прочность бетона снижается, а относительные деформации растут с гораздо большей скоростью, чем при нормальных влажностных условиях. При благоприятных влажностных условиях снижение прочности бетона и рост относительных деформаций с течением времени также наблюдается, но скорость существенно меньше. С учетом того, что стадия эксплуатации объекта капитального строительства, в целом, и конструкций, входящих в его состав, в частности, рассчитана на длительный период, в течение этого времени тот или иной влажностный режим окружающей среды понемногу способствует проявлению в бетоне дополнительной гидратации цемента или, наоборот, постепенной деактивации химических связей между цементной матрицей и заполнителями. Это так называемые периоды упрочнения и проявления деструктивных процессов в бетоне. В ходе длительной эксплуатации изгибаемых и внецентренно сжатых железобетонных конструкций период развития деструктивных процессов деформативно-прочностных характеристик в бетоне становится преобладающим, а темпы этого процесса во многом зависят от относительной влажности окружающего воздуха.

В зависимости от относительной влажности воздуха при эксплуатации бетонных или железобетонных конструкций в СП 63.13330 [96] рекомендовано учитывать три диапазона влажностных условий эксплуатации: при относительной влажности свыше 75 %, 40-75 %, 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} [96].

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

Следует отметить, что согласно СанПиН 2.1.2.1002-00 [97] для комфортного длительного пребывания людей, параметры относительной влажности в летний период допустимо не более 65% , в зимний период – не более 60% (рисунок 1.11).

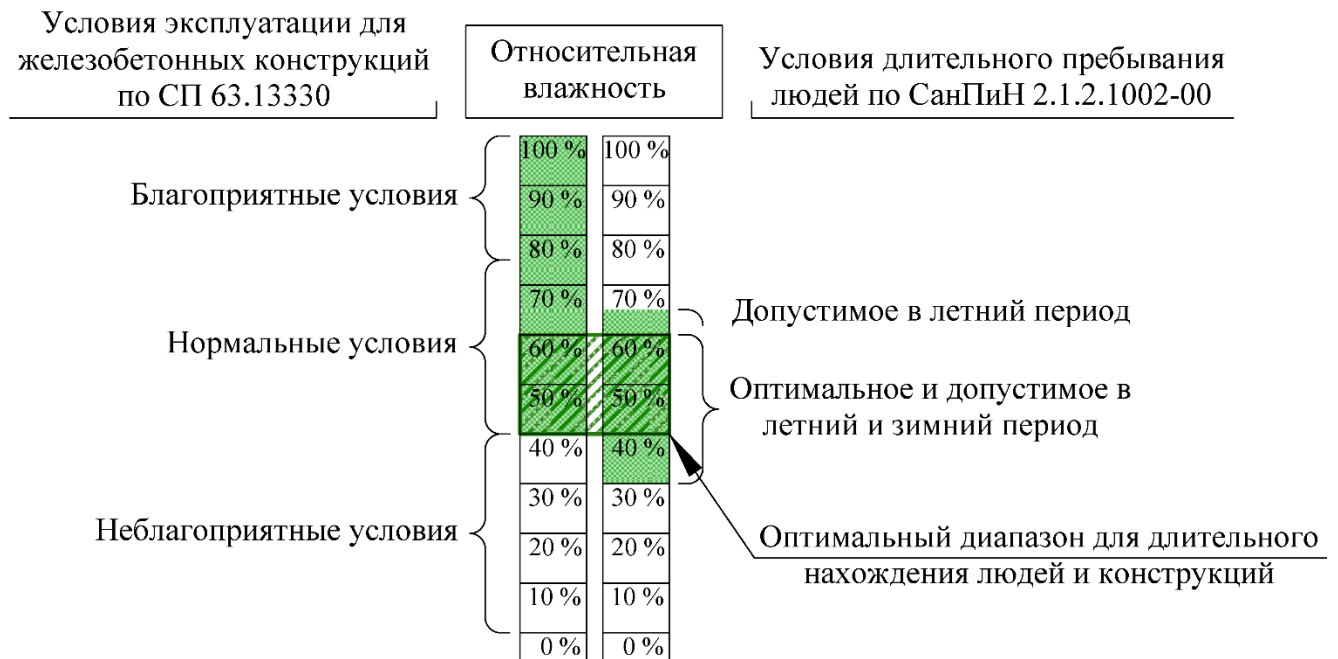


Рисунок 1.11 – Сравнение оптимальных диапазонов относительной влажности для железобетонных конструкций по СП 63.13330 и для длительного пребывания людей по СанПиН 2.1.2.1002-00

Благоприятные условия эксплуатации железобетонной конструкции достигаются в помещениях, предусматривающих кратковременное пребывание людей, и таких видов помещений с высокой влажностью относительно немного, при том, что отделка конструкций в помещениях предусматривает гидроизоляцию, существенно уменьшающую степень влияния влажности на прочностные параметры бетона. Поэтому в работе следует рассмотреть все три вида влажностных условий, но более пристальное внимание уделить нормальным и неблагоприятным условиям эксплуатации, перепады между которыми могут существенно влиять на продолжительность эксплуатации конструкций.

1.3. Существующие методики определения продолжительности жизненного цикла объектов капитального строительства различного назначения

Расчеты строительных конструкций несут своей целью, в первую очередь, недопущение наступления в них предельных состояний на протяжении всего периода эксплуатации в составе объекта капитального строительства. Во время длительной эксплуатации в конструкции накапливаются повреждения, приводящие к снижению ее несущей способности. На работу железобетонной конструкции внутри здания в течение длительного времени влияет множество факторов, таких как характер нагружения конструкции, температура, ползучесть и усадка бетона и др. Вопросы установления сроков безопасной эксплуатации объектов капитального строительства являются важной задачей, требующей комплексного решения [98-101].

В работе [102] представлена математическая модель деформирования бетона во времени на основании критериев длительной прочности для одноосного напряженного состояния (а также для сложного (трехосного)) при действии постоянной внешней нагрузки или изменяющейся во времени по произвольному закону.

Учет эффекта старения сводится к определению его предела прочности на сжатие (при одноосном напряженном состоянии) [102]:

$$R(t) = R_m \left[1 - \left(1 - \frac{R_{28}}{R_m} \right)^{\frac{t_0+t}{28}} \right], \quad (1.2)$$

где t_0 – время в сутках от момента изготовления (укладки) бетона до момента приложения внешней нагрузки; t – время действия внешней нагрузки; R_m – максимальная (асимптотическая) прочность ненагруженного бетона (при $t_0 \rightarrow \infty$); R_{28} – прочность бетона в возрасте 28 сут.

Характер изменения прочности во времени показан на рисунке 1.12, однако, как оговаривает автор в своей работе, данная методика не рассчитана на прослеживание характера работы для всего периода эксплуатации здания.

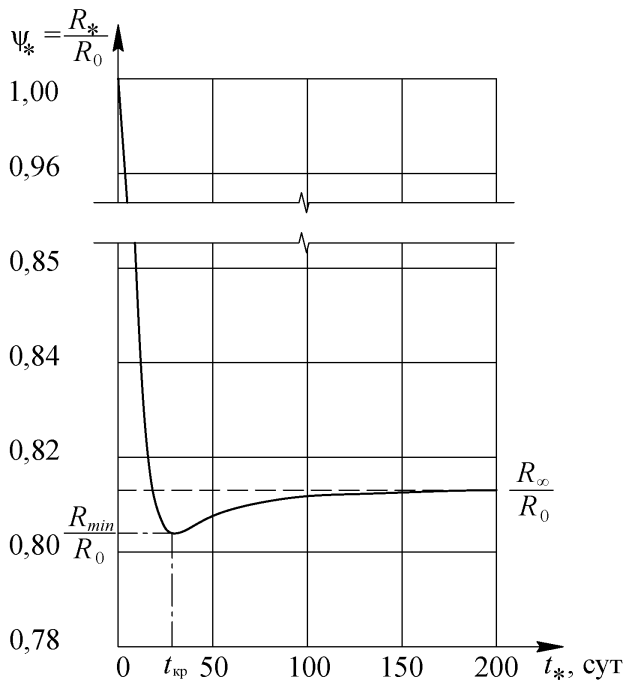


Рисунок 1.12 – Изменение прочности бетона во времени [102]

Данная методика расчета долговечности позволяет получить конкретные результаты, но рассчитана на кратковременные нагрузки, так что для рассмотрения воздействия длительных нагрузок на свойства бетона не может быть применена.

В работе [103] предлагается определять длительную прочность и выносливость бетонов на основании концепции о том, что величина $W^0(t_0)$ потенциальной энергии разрушения материала не зависит от того, каким

образом она будет исчерпываться при $t \geq t_0$.

Согласно концепции:

$$W^0(t_0) = W(t_0), \quad (1.3)$$

где $W(t_0)$ – начальная энергия целостности.

При длительном разрушении материала, завершаемом к концу промежутка времени $T = t - t_0$, в силу закона сохранения энергии:

$$W^0(t_0) = W(t) + W_\delta(t), \quad (1.4)$$

где $W_\delta(t)$ – диссипативно рассеянная за время T часть начальной энергии целостности $W(t_0)$.

Из уравнений (1.2) и (1.3) получено:

$$W(t_0) = W(t) + W_\delta(t). \quad (1.5)$$

Соотношение (1.4) влечет зависимость между начальной прочностью $R(t_0)$ и прочностью $R(t)$ в момент наблюдения t :

$$R(t) = \eta(t)R(t_0), \quad (1.6)$$

где $\eta(t)$ – эмпирический параметр длительной прочности бетона.

В работе [104] применение теории накапливаемых повреждений позволяет установить связь между напряженным состоянием, условиями и временем эксплуатации конструкции. Такой подход позволяет учитывать изменения внутренних свойств конструкции с течением времени, повторно-периодический характер воздействия внешней нагрузки, накапливание повреждений с течением времени, вероятностная природа несущей способности и нагрузок [104]. Уравнение, описывающее данную концепцию:

$$\int_0^1 \frac{dD}{\int_0^T \int_{\sigma_0}^{\infty} \left[\sum_{i=1}^l D'_{x_i}(D, \sigma) \varphi'_i(t) \right] p(\sigma; t) d\sigma dt} = 1, \quad (1.7)$$

где σ_0 – уровень напряжений, при котором возникают повреждения; $D'_{x_i}(D, \sigma)$ – скорость изменения многофакторной меры повреждений по переменной x_i ($i = 1, 2, \dots, l$); $p(\sigma; t)$ – плотность распределения максимальных напряжений процесса нагружения; $\varphi'_i(t)$ – производная по времени t зависимости фактора $x_i = \varphi'_i(t)$; T – срок службы конструкции.

Характер изменения сроков службы конструкций в зависимости от выносливости бетона и коррозии арматуры [104] представлены на рисунке 1.13.

В работе [105] при рассмотрении долговечности железобетонных конструкций сооружений также за основу взят вероятностный характер силовых и несиловых воздействий, их комплексность и взаимосвязь несущей способности и нагрузок. С учетом того, что авторами рассматриваются, в первую очередь, транспортные сооружения, большое внимание уделено вопросу влияния коррозионных процессов на конструкцию.

В целом вопросам определения долговечности железобетонных конструкций, подвергающимся в течение стадии эксплуатации агрессивным воздействиям, учеными уделяется много внимания.

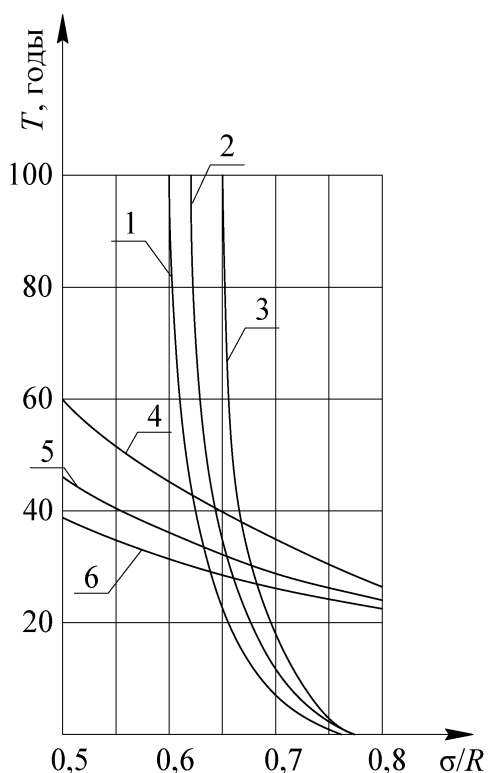


Рисунок 1.13 – Сроки службы железобетонной конструкции [104]:

1, 2, 3 – при действии многократно повторной нагрузки с уровнем постоянных напряжений соответственно 0; 0,5; 0,15 от призмной прочности; 4, 5, 6 – при коррозии арматуры со скоростью 0,01; 0,0125 и 0,015 мм/год

В работе [106] были разработаны расчетные модели и методы, позволяющие оценивать и прогнозировать ресурс железобетонных изгибаемых элементов, работающих в условиях агрессивных сред, на основе фундаментальных законов механики, физической химии, метода предельных состояний. В работе [107] долговечность железобетонных конструкций, подвергающихся воздействию агрессивных сред, рассматривается с позиций определения ширины раскрытия продольных трещин $a_{срс}$.

В работе [108] автор дает понятие живучести изгибаемых элементов как степени работоспособности конструкции, что является основой для определения ее долговечности (остаточного ресурса). Методика живучести изгибаемых элементов предполагает проверку стадий работы на отсутствие или наличие

повреждений в сжатой зоне в виде опасных продольных мезо- или макротрещин, определяющих долговечность под влиянием длительно действующей нагрузки или агрессивной среды. Также с учетом того, что методика рассчитана на определение остаточного ресурса конструкций, находящихся в условиях агрессивных сред, даются рекомендации по их обследованию, так как процесс обследования для получения исходных данных для расчетов при таких условиях затруднен.

Особая сложность при исследовании конструкций на длительную прочность заключается в подтверждении результатов экспериментальными исследованиями. Это связано с тем, что изменение параметров напряженно-деформированного состояния элементов каркаса на протяжении жизненного цикла здания происходит при большой длительности воздействия силовых и средовых

воздействий на конструкцию, которая для гражданских зданий, не относящихся к категории уникальных, может занимать более 50 лет [26]. Во время длительной эксплуатации в конструкции накапливаются повреждения, приводящие к снижению ее несущей способности. На работу железобетонной конструкции внутри здания в течение длительного времени влияет множество факторов, таких как характер нагружения конструкции, параметры микроклимата помещения, особенно относительная влажность окружающей среды [109, 110], воздействие агрессивных факторов среды (при наличии), в результате чего в материале проявляются ползучесть, усадка бетона.

Экспериментальные исследования длительной прочности бетона при исследовании агрессивных воздействий на конструкцию могут быть реализованы путем ускоренных испытаний. В работе [111] было изготовлено и испытано 12 опытных образцов прямоугольного сечения размерами поперечного сечения 60×100 (h) мм, пролетом 1,4 м. Для моделирования агрессивной среды в состав бетона была введена добавка NaCl в соотношении 5 % от массы цемента, с последующим смачиванием поверхности образцов. В течение 14 и 21 мес. образцы подвергались агрессивным и силовым воздействиям. Длительное силовое нагружение было обеспечено сосредоточенной нагрузкой $P = 0,7P_{разр}$. По окончании периода испытаний образцы были разгружены и испытаны кратковременным нагружением, была исследована коррозия бетона и арматуры.

Методики рассмотрения долговечности железобетонных конструкций в условиях агрессивных сред сильно непосредственно связаны с воздействием конкретного вещества на конструкции и не являются универсальными.

В настоящее время отсутствует единая методика расчета длительной прочности бетона, в связи с чем разработка методики, учитывающей воздействия на несущие железобетонные элементы влажностных условий эксплуатации является актуальным исследованием.

1.4. Аналитический обзор исследований о необходимости учета влияния длительного воздействия влажностных условий на деформативно-прочностные характеристики бетона при сжатии и растяжении

Первые систематизированные сведения об исследованиях влияния различных влажностных условий на деформативно-прочностные характеристики бетона при действии на него длительных нагрузок были представлены в монографии А.М. Невилля [112]. Хотя и до этого времени отдельные исследования в нашей стране и за рубежом выполнялись при изучении процессов ползучести бетона. В частности, некоторые результаты о зависимости процесса ползучести от величины относительной влажности среды в помещениях, где длительный период находятся испытываемые бетонные образцы (призмы или цилиндры), отмечались в работах Р. Залигера, В.А. Бушкова, Я.В. Столярова и других ученых.

В монографии А.М. Невилля [112] приведены экспериментальные исследования процесса ползучести центрально сжатых бетонных образцов при различной относительной влажности окружающей среды. Изучалось влияние различных вариантов воздействия влажностных условий на относительные деформации бетонных образцов, нагруженных постоянной сжимающей нагрузкой. Так, значительная группа одинаковых бетонных образцов испытывалась при постоянной влажности 50, 70 и 100 %. Еще одни испытания были выполнены при двух значениях относительной влажности окружающего воздуха: 35 и 70 %. При этом время выдерживания под нагрузкой составило, соответственно, 28, 90 и 360 суток. На основании результатов всех этих испытаний автор отмечает, что относительная влажность окружающей среды является одним из основных факторов, влияющих на ползучесть бетона при сжатии. Также из приведенных автором графиков следует, что относительные деформации бетона при длительном сжатии приобретают тенденцию к снижению с ростом значений относительной влажности при прочих равных условиях.

Аналогичные результаты были получены в монографии З.Н. Цилосани [113], где отмечается, что при выдерживании под нагрузкой бетонных образцов в

водной среде, т.е. при относительной влажности 100 %, их ползучесть оказывается существенно меньше, чем при влажности воздушной среды, соответственно, 50 и 70 %. При этом для одинаковых сроков нахождения под нагрузкой наибольшее значение относительной деформации всегда соответствовало меньшей величине влажности (50 %).

Значительный объем исследований по проблематике влияния влажности окружающего воздуха на деформативно-прочностные параметры бетона выполнен С.В. Александровским [114]. Результаты, приведенные в данной работе, принципиально не отличаются от вышеизложенных данных. Важным дополнением к ним может служить выявленная зависимость величины модуля упругости бетона от его возраста, предел которого для обычных тяжелых бетонов составляет приблизительно 180 суток с момента бетонирования. При этом относительная влажность бетона в момент его нагружения находилась в диапазоне от 90 до 100 %.

Исследования перечисленных здесь и других ученых позволили разработать рекомендации для определения относительных деформаций ползучести бетона при сжатии, а также деформаций при его усадке [115, 116]. При этом, эти величины в значительной степени зависят от относительной влажности окружающей среды.

Конкретные величины предельных относительных деформаций при центральном и неоднородном сжатии, а также при растяжении были впервые введены в 2011 году в базовый нормативный документ по проектированию бетонных и железобетонных конструкций, включая его последнюю редакцию [96]. Указанные параметры имеют различные значения в зависимости от относительной влажности воздуха окружающей среды, распределенных по трем видам (< 40 %, 40-75 %, > 75 %), но без учета особенностей деформирования бетонов разных классов по прочности на сжатие.

Также следует отметить, что практически все перечисленные выше исследования [112-114] о необходимости учета влияния длительного воздействия влажностных условий на деформативно-прочностные характеристики бетона при

сжатии и растяжении имеют оценочные суждения о наблюдавшихся в экспериментах изменениях величин предельных сопротивлений бетона в зависимости от влажности. Но четких и конкретных экспериментальных данных никто из них не приводит.

Таким образом, на основании данного обзора подтверждена необходимость разработки методики, позволяющей получить величины деформативно-прочностных характеристик бетонов при длительной эксплуатации железобетонных конструкций в зависимости от влажностных условий окружающей среды, от периода нагружения и от класса по прочности на сжатие. Эти характеристики позволят более обоснованно и точно определять напряженно-деформированное состояние железобетонных конструкций на любом этапе жизненного цикла, например, гражданского здания, в котором они находятся.

1.5. Выводы по первой главе

1. Повышение эффективности процесса управления жизненным циклом объекта капитального строительства является одним из важнейших направлений в современных условиях. Управление жизненным циклом объекта капитального строительства – это комплексная система, состоящая из большого количества элементов и зависящая от большого количества факторов, оказывающих на нее влияние, среди которых – длительный срок использования строительной продукции, большое количество участников, задействованных в создании и дальнейшей эксплуатации объекта и др.

2. Наибольшая доля объектов капитального строительства производится с применением железобетона, как относительно экономичного, но при этом надежного с точки зрения конструктивной безопасности материала. В зданиях с железобетонным каркасом состояние несущих конструкций является критически важным фактором для обеспечения безопасности и комфортного нахождения людей, поэтому при исчерпании несущей способности элементов каркаса здания, можно говорить о выходе из строя объекта капитального строительства в целом.

3. На железобетонные конструкции в процессе длительной эксплуатации среди прочих аспектов существенное влияние оказывают влажностные условия.

4. На текущий момент нет разработанной методики расчета длительной прочности бетона, готовой к применению, хотя этот вопрос исследуется и волнует многих ученых. Требуется разработка методики, в том числе с учетом воздействия на несущие элементы влажностных условий эксплуатации.

2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. Постановка цели и задач исследования

В данной работе в качестве объекта капитального строительства рассматриваются гражданские здания. Рассмотрение производственных и сельскохозяйственных зданий не предполагается, в силу того, что условия эксплуатации таких объектов существенно отличаются в зависимости от функционального назначения и часто сопряжены с агрессивными воздействиями, характер которых специфичен для конкретного вида производства, поэтому такие объекты в данной работе не рассматриваются. Виды основных конструктивных схем зданий представлены на рисунке 2.1.

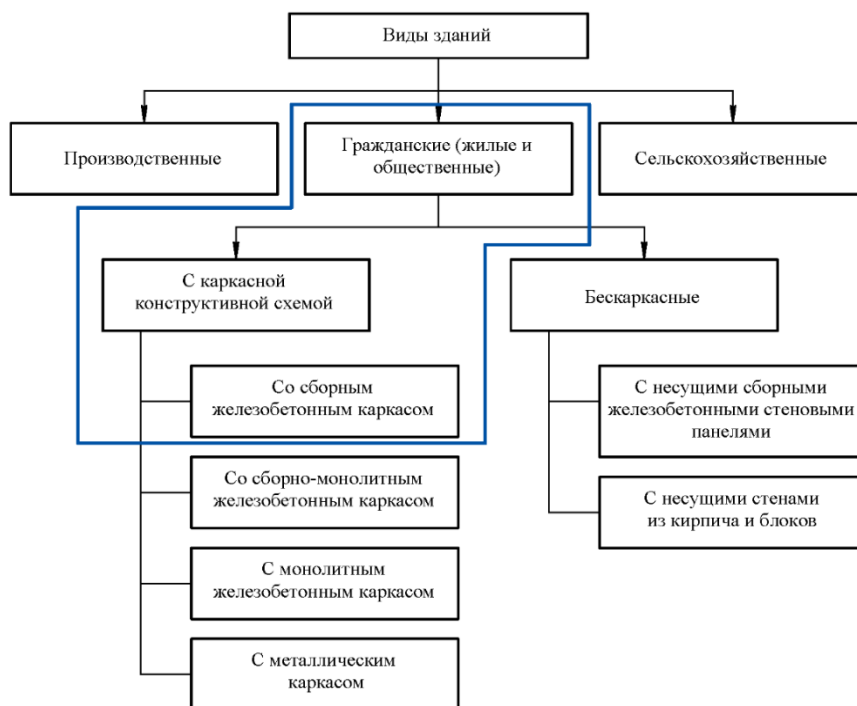


Рисунок 2.1 – Выбранная область для исследования, исходя из видов зданий

Объектом данной работы было принято решение выбрать здания с железобетонным каркасом, так как доля применения железобетона в строительстве существенно выше, чем металлических конструкций, в силу относительно меньшей стоимости материалов, при обеспечении безопасной эксплуатации элемента при значениях параметров НДС, не превышающих предельные значения по первой и второй группе предельных состояний.

Что касается технологических решений, предполагается, что рекомендации по управлению жизненным циклом зданий со сборным железобетонным каркасом с учетом влажностных условий эксплуатации, могут в дальнейшем быть адаптированы также и для других вариантов конструктивных схем: с монолитным, сборно-монолитным каркасом, а также со сборными несущими стеновыми панелями. Состояние несущих конструкций здания является критически важным фактором для обеспечения безопасной и комфортной для людей работы объекта капитального строительства.

Таким образом, наибольшая доля объектов капитального строительства производится с применением железобетона, как относительно экономичного, но при этом надежного с точки зрения конструктивной безопасности материала. В зданиях с железобетонным каркасом состояние несущих конструкций является критически важным фактором для обеспечения безопасности и комфортного нахождения людей, поэтому при исчерпании несущей способности элементов каркаса здания, можно говорить о выходе из строя объекта капитального строительства в целом.

Цели и задачи исследования приведены на рисунке 2.2.

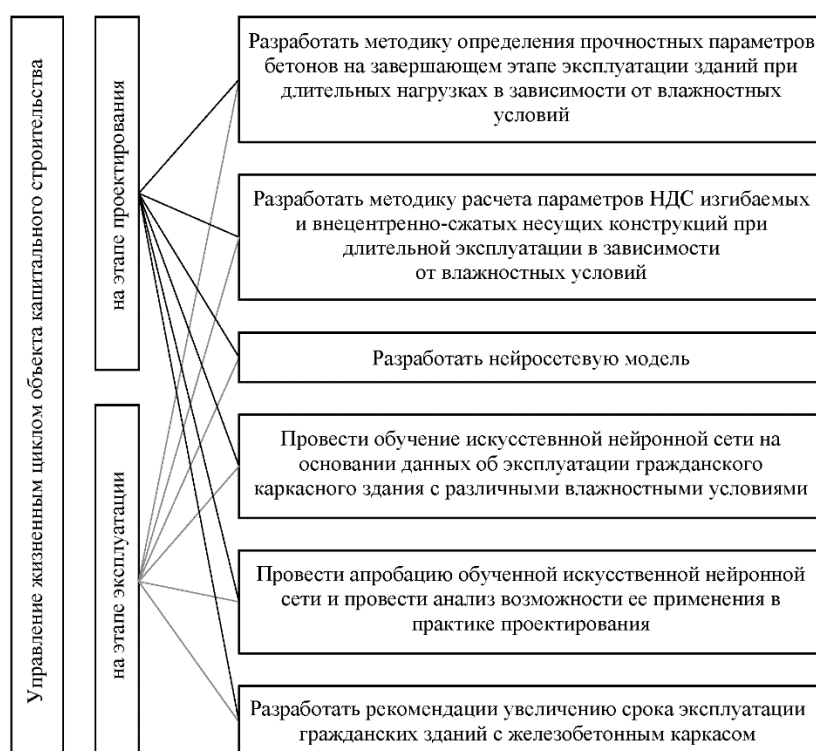


Рисунок 2.2 – Цели и задачи исследования

Исходя из анализа, приведенного в главе 1, влажностные условия микроклимата помещений оказывают существенное влияние на железобетонные конструкции при их эксплуатации в условиях длительного нагружения.

С учетом того, что необходима обработка большого массива данных для принятия управленческих решений применительно к жизненному циклу объекта капитального строительства для прогнозирования сроков его эксплуатации на этапе проектирования и эксплуатации, необходимо применение искусственной нейронной сети. Искусственные нейронные сети успешно используются в различных сферах и продолжают развиваться [117-119].

2.2. Разработка структуры модели искусственной нейронной сети

В рамках исследования проведено прогнозирование предельного срока эксплуатации гражданского здания, на основании расчета предельных значений параметров НДС изгибаемых железобетонных конструкций каркаса при длительной эксплуатации с учетом влажностных условий с использованием моделей искусственных нейронных сетей.

Применительно к несущим железобетонным конструкциям для формирования условий эксплуатации гражданского здания в виде численной модели были выбраны следующие параметры:

– климатические параметры окружающей среды: температура воздуха, относительная влажность, скорость ветра, атмосферное давление, ориентация здания относительно сторон света, что учитывается коэффициентами сторон света [120];

– характеристики сечения железобетонной конструкции, такие как ширина и высота поперечного сечения, класс бетона, класс сжатой и растянутой арматуры, содержание сжатой и растянутой арматуры и др., исходя из которых определяются параметры НДС конструкций.

Среди параметров микроклимата помещений, в которых размещены рассматриваемые конструкции, была выбрана для рассмотрения относительная влажность, как наиболее важный элемент, воздействующий на железобетонные конструкции. Температура внутри помещений не учитывалась, так как

помещения предназначены для постоянного пребывания людей, а значит существенно низких или наоборот высоких (как при горячих производствах) температур, оказывающих существенное влияние на конструкции, не предвидится. Температура оказывает влияние на уровень относительной влажности внутри помещений.

В качестве исходных данных были приняты следующие показатели:

1. Климатические показатели [120]:

- среднесуточная температура наружного воздуха (L1);
- относительная влажность наружного воздуха (L2);
- скорость ветра (L3);
- атмосферное давление (L4).

2. Параметры железобетонных конструкций и условий их эксплуатации:

- относительная влажность в помещении (L5);
- ориентация конструкции по сторонам света (L6);
- текущий срок эксплуатации (L7).

Среднесуточная температура наружного воздуха – средняя величина температуры наружного воздуха, измеренная в определенные часы суток через одинаковые интервалы времени. Принимается по данным метеорологической службы.

Относительная влажность наружного воздуха – количество водяного пара, содержащегося в воздухе, относительно максимального количества, которое может содержаться при данной температуре, что влияет на теплообмен и комфортность внутренней среды здания.

Скорость ветра – скорость движения воздуха вокруг здания, влияющая на теплообмен и перепад давления на поверхностях здания.

Атмосферное давление – мера воздействия воздушных масс на поверхность Земли и находящиеся на ней объекты.

Ориентация конструкции – это ориентация ограждения помещения по сторонам света, которая влияет на естественное освещение и ветровую нагрузку

на здание. Данный показатель характеризуется добавочными потерями тепла на ориентацию по сторонам света.

Влияние коррозионных воздействий при длительной эксплуатации не принимается во внимание в силу отсутствия агрессивных воздействий в рассматриваемых гражданских зданиях. Негативное воздействие влажности на арматуру также принимаем не оказывающим существенного влияния.

В работе [121] были исследованы и испытаны 7 железобетонных перемычек, которые использовались в общественном здании над проемами наружной стены в течение 52 лет. Среда характеризуется как неагрессивная, условия по относительной влажности воздуха – нормальные [121].

В нескольких образцах были обнаружены дефекты при изготовлении, выраженные непроектным размещением арматурных стержней и уменьшением содержания арматуры, которые привели к снижению прочности, трещиностойкости и жесткости конструкций. По результатам испытаний [121] был сделан вывод о том, что такие повреждения, накопленные за 52 года, не оказали существенного влияния на работу под нагрузкой конструкций железобетонных перемычек наружных несущих стен общественного здания.

Таким образом, был определен перечень параметров для датасета искусственной нейронной сети.

2.3. Разработка модели искусственной нейронной сети

2.3.1. Формирование структуры обучающего датасета

Методология формирования обучающего датасета базировалась на системном подходе к отбору информативных признаков, обеспечивающих комплексную оценку факторов деградации строительных конструкций. Структура датасета разработана в соответствии с принципом иерархической детерминации остаточного ресурса, предполагающим учет внешних воздействий, внутренних свойств объекта и динамики изменения его технического состояния во времени.

С учетом того, что в изгибаемых несущих элементах, как правило ресурс исчерпывается раньше, чем во внецентренно сжатых, для датасета принят изгибаемый элемент. Тем не менее, планируемая к разработке методика будет включать в себя также расчет параметров НДС и для внецентренно сжатых железобетонных сборных конструкций. Было рассчитано, что исчерпание ресурса изгибаемого элемента наступает по первой группе предельных состояний, однако учет завершения срока безопасной эксплуатации по деформативности также возможен.

В рамках исследования проведено прогнозирование остаточного ресурса объекта капитального строительства с использованием моделей искусственных нейронных сетей (ИНС).

2.3.2. Разработка структуры модели искусственной нейронной сети

Для разработки моделей ИНС были выполнены следующие этапы:

1. Проведение исследований с целью получения данных об эксплуатационных показателях несущих железобетонных конструкций каркаса.
2. Сбор данных об изменении несущей способности железобетонного изгибаемого элемента каркаса.
3. Запись и подготовка обучающего датасета.
4. Создание, обучение и тестирование разработанных моделей ИНС.
5. Отслеживание результатов и выбор лучшей структурной модели.
6. Определение остаточного ресурса гражданского здания с использованием выбранных моделей ИНС.
7. Оценка валидации обученной модели на новом датасете.

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. Оптимизация параметров сети выполнялась с применением квазиньютоновского алгоритма Бroyдена-Флетчера-Гольдфарба-Шанно, в то время как функция гиперболического тангенса использовалась в качестве функции активации нейронов скрытого слоя [122-124].

Алгоритм оптимизации Бройдена-Флетчера-Гольдфарба-Шанно реализован в квазиньютоновской модификации, которая исключает прямое и вычислительно затратное определение матрицы вторых производных целевой функции. Вместо этого на каждой итерации алгоритм строит последовательную аппроксимацию этой матрицы на основе анализа изменений градиента функции потерь и соответствующих смещений вектора весовых коэффициентов между соседними шагами оптимизации. Начальная аппроксимация формируется как масштабированная единичная матрица, где масштабный множитель определяется отношением скалярных произведений векторов изменения градиента и смещения весов на первом шаге. Такой подход обеспечивает суперлинейную скорость сходимости при значительно меньших вычислительных издержках по сравнению с классическим методом Ньютона, что особенно важно при работе с моделями, содержащими сотни и тысячи обучаемых параметров.

Для повышения устойчивости процесса оптимизации реализован адаптивный механизм коррекции величины шага обучения. Базовое значение шага устанавливалось равным 0,01 на основе предварительного анализа поведения функции потерь в окрестности начальной точки инициализации. После каждой эпохи обучения выполнялась проверка динамики изменения функции потерь на валидационном подмножестве: при отсутствии статистически значимого улучшения (менее 0,01 %) в течение пяти последовательных эпох величина шага уменьшалась в два раза. Нижняя граница шага ограничивалась значением 10^{-6} для предотвращения преждевременной остановки оптимизации в условиях пологого рельефа функции потерь, тогда как верхняя граница 0,1 исключала риск расходимости при резких изменениях кривизны ландшафта оптимизации. Такая стратегия адаптации позволяла эффективно преодолевать участки с различной локальной кривизной без ручной настройки гиперпараметров.

Механизм ранней остановки реализован как двухуровневая система контроля качества сходимости. На первом уровне после каждой эпохи фиксировалось текущее значение среднеквадратической ошибки на валидационной выборке и сравнивалось с минимальным достигнутым значением за весь период обучения.

При обновлении минимума выполнялось немедленное сохранение полной конфигурации весовых коэффициентов в специальный буфер «лучшей модели». На втором уровне велся подсчет последовательных эпох без улучшения метрики с точностью до 0,01 %; при достижении порога в 15 эпох обучение прекращалось, а в качестве финальной принималась именно та конфигурация весов, которая была сохранена в буфере при достижении глобального минимума ошибки на валидации, а не текущее состояние сети. Для исключения ложных срабатываний, вызванных кратковременными шумовыми флуктуациями ошибки, введена дополнительная защита: остановка инициировалась только при условии, что текущее значение ошибки превышает минимальное более чем на 2 %, что позволило отфильтровать случайные колебания в процессе сходимости и обеспечить надежное выявление момента начала переобучения.

Дополнительно в процедуру оптимизации интегрирован критерий остановки по норме градиента целевой функции: при снижении евклидовой нормы градиента ниже порога 10^{-5} обучение прекращалось независимо от поведения валидационной ошибки, что гарантировало достижение точки, близкой к стационарной. Для предотвращения застревания алгоритма в седловых точках выполнялся косвенный контроль спектральных свойств аппроксимированной матрицы кривизны: при обнаружении признаков доминирования отрицательных собственных значений (выявляемых через анализ отношения приращений градиента и смещений весов) в течение трех последовательных итераций инициировалась процедура локальной рандомизации – 5 % весовых коэффициентов случайным образом модифицировались в пределах $\pm 0,01$ от текущего значения с последующим возобновлением оптимизации. Такая комбинация адаптивного управления шагом, двухуровневого контроля сходимости по валидационной ошибке, критерия остановки по градиенту и защиты от седловых точек обеспечила устойчивую сходимость алгоритма к точке минимума с минимальным риском как переобучения, так и недообучения модели.

Построение моделей на основе ИНС требует предварительного стратифицированного разделения данных на три непересекающихся

подмножества: обучающее, валидационное и контрольное (рисунок 2.3, а). Данная процедура направлена на минимизацию риска переобучения и объективную оценку обобщающей способности модели.

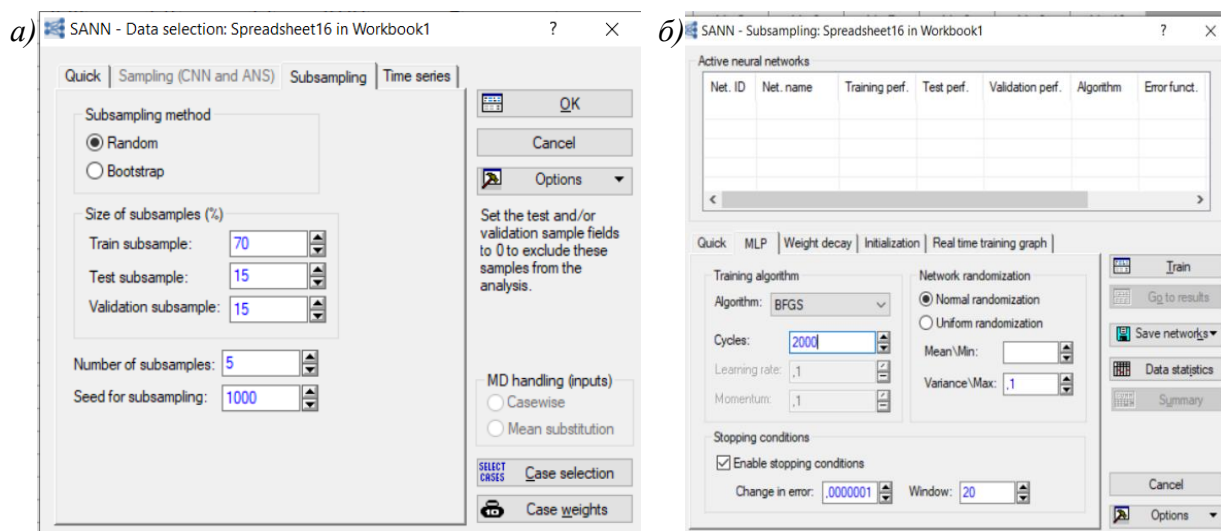


Рисунок 2.3 – Создание подвыборки: а – задание количества нейронных сетей при построении и разбиение данных на подмножества; б – задание количества циклов построения

Обучающая выборка (70 % данных) используется для непосредственной оптимизации параметров сети путем минимизации функции потерь с использованием методов обратного распространения ошибки.

Валидационная выборка (15 % данных) служит для мониторинга процесса обучения и раннего выявления переобучения. Критическим индикатором является расхождение метрик: рост ошибки на валидационном подмножестве при ее снижении на обучающем свидетельствует о деградации способности модели к обобщению.

Контрольная выборка (15 % данных) представляет собой изолированный набор данных для финальной верификации полностью обученной модели. Полученные на ней метрики служат объективной оценкой способности модели к работе с новыми данными.

Обучающий процесс был организован с применением процедуры пятикратной кросс-валидации, на каждой итерации которой строилось пять независимых моделей. Количество нейронов в скрытом слое варьировалось от 2 до 50 с шагом 2, число эпох обучения составило 2000 (рисунок 2.3, б). Для оценки

моделей использовались среднеквадратическая ошибка (RMSE) на всех подмножествах и временные затраты.

Стратификация выборок осуществлялась по значению целевой переменной – остаточному ресурсу гражданского здания – с целью сохранения исходного распределения прогнозируемой величины во всех подмножествах. Для этого диапазон значений остаточного ресурса был разбит на десять равных интервалов (страт), после чего из каждой страты пропорционально ее объему отбирались наблюдения в обучающее, валидационное и контрольное подмножества. Такой подход обеспечил статистическую однородность распределений целевой переменной между подвыборками: критерий Колмогорова–Смирнова не выявил значимых различий ($p > 0,15$ для всех пар подмножеств), что исключило систематический сдвиг прогнозов вследствие дисбаланса выборок.

Процедура пятиточечной кросс-валидации реализована с учетом временной структуры данных: при формировании фолдов соблюдался принцип хронологической непрерывности, исключающий попадание наблюдений одного и того же объекта в разные фолды одновременно. Каждый фолд содержал полную историю наблюдений для объектов датасета, что предотвратило утечку информации между обучающим и валидационным подмножествами.

2.4. Выводы по второй главе

1. Сформированы цель и задачи применения искусственной нейронной сети.
2. Определен ряд параметров, которые влияют на остаточный ресурс несущего каркаса гражданского здания, и которые планируются для включения в датасет искусственной нейронной сети.
3. Обоснована методология применения искусственных нейронных сетей для прогнозирования остаточного ресурса гражданских зданий. Выбрана архитектура многослойного персептрона с нелинейной функцией активации в скрытом слое и квазиньютоновским алгоритмом оптимизации параметров, реализованная в программном пакете STATISTICA Neural Networks.
4. Сформирована структура обучающего датасета на основе системного анализа факторов деградации строительных конструкций при длительной

эксплуатации. Обоснован перечень входных данных, необходимых для решения задачи определения параметров, влияющих на остаточный ресурс гражданского здания.

5. Разработана комплексная процедура обучения и валидации модели, включающая стратифицированное разделение данных с сохранением распределения целевой переменной, кросс-валидацию с разделением по объектам для исключения утечки информации, регуляризацию весовых коэффициентов и механизм ранней остановки с последующей оценкой валидации обученной модели на независимом контрольном подмножестве.

3. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СРОКОВ БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ НЕСУЩИХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ КАРКАСНЫХ ГРАЖДАНСКИХ ЗДАНИЙ С УЧЕТОМ РАЗЛИЧНЫХ ВЛАЖНОСТНЫХ УСЛОВИЙ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Обеспечение надежности и долговечности несущих железобетонных конструкций каркасного гражданского здания является приоритетным направлением при управлении его жизненным циклом. Наиболее стратегически важным компонентом с точки зрения конструктивной безопасности длительно эксплуатируемых зданий является несущая способность основных конструктивных элементов на завершающем этапе их жизненного цикла, то есть в конце заданного срока службы объекта [104, 125]. При этом конструкции должны быть запроектированы таким образом, чтобы их несущая способность не снижалась ниже заданного нормативного предела вплоть до времени вывода здания из эксплуатации [104, 125-127]. Решение этой задачи при проектировании железобетонных конструкций сильно осложняется в связи с тем, что в нагруженном бетоне в процессе длительной эксплуатации зданий и сооружений под действием различных внешних воздействий, в том числе несиловых (отрицательная или положительная температура, влажная или сухая окружающая среда, водные или паровоздушные химические реагенты и др.) могут поочередно как ускоряться, так и замедляться процессы, связанные с увеличением деформаций в течение времени [126, 128]. В связи с этим рассматривается разработка методики определения деформативно-прочностных характеристик бетонов, из которых были изготовлены несущие железобетонные конструкции, после их длительной эксплуатации с учетом влажностных условий окружающей среды в составе каркасных гражданских зданий для дальнейшего их применения при расчете параметров НДС изгибаемых и внецентренно сжатых конструкций.

3.1. Параметры диаграмм центрального и неоднородного сжатия бетона железобетонных конструкций с учетом различных влажностных условий окружающей среды при их длительной эксплуатации

Как уже говорилось ранее, в зависимости от средней относительной влажности воздуха во внутренних помещениях зданий согласно [96] предлагается учитывать три диапазона влажностных условий эксплуатации: по относительной влажности воздуха более 75 % (благоприятные условия эксплуатации), от 40 до 75 % (нормальные условия эксплуатации), по относительной влажности воздуха менее 40 % (неблагоприятные условия эксплуатации).

Для каждого из указанных трех диапазонов влажностных условий в [96] приведены усредненные значения предельных относительных деформаций при длительном осевом сжатии (ε_{b0}) и при длительном неоднородном сжатии (ε_{b2}). Параметр ε_{b2} соответствуют наибольшей величине относительной деформации в сжатой зоне бетона изгибаемого или внецентренно сжатого длительно нагруженного элемента при его разрушении по сжатой зоне [127].

Расчетные сопротивления бетона сжатию R_b приняты в [96] без учета влияния относительной влажности воздуха. Конкретные величины R_b находятся путем умножения нормативных сопротивлений бетона R_{bn} для рассматриваемого класса по прочности на сжатие на коэффициент 0,69, получаемый из отношения γ_{b1}/γ_b . В [96] $\gamma_{b1} = 0,9$ – 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.

Для выполнения конструктивных расчетов изгибаемых и внецентренно сжатых железобетонных элементов при продолжительном действии на них нагрузки в настоящее время привлекаются прикладные программы для ЭВМ. При этом в составе алгоритмов этих программ более целесообразным было бы использовать различные по величине значения предельных относительных деформаций при осевом (ε_{b0}) и неоднородном сжатии (ε_{b2}) в зависимости от классов бетона для трех диапазонов влажностных условий. Расчетное

сопротивление бетона сжатию R_b также должно учитывать влияние относительной влажности воздуха в помещениях, в частности, применительно к трем видам условий, указанным в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Относительные деформации бетона при длительном сжатии и растяжении согласно [96]

Относительная влажность воздуха, %	Относительные деформации тяжелого бетона при продолжительном действии нагрузки			
	при сжатии		при растяжении	
	осевом (ε_{b0})	неоднородном (ε_{b2})	осевом (ε_{bt0})	неоднородном (ε_{bt2})
> 75	0,0030	0,0042	0,00021	0,00027
40-75	0,0034	0,0048	0,00024	0,00031
< 40	0,0040	0,0056	0,00028	0,00036

Для разработки методики определения деформативно-прочностных характеристик бетонов для сжатия с учетом различных влажностных условий на завершающем этапе эксплуатации гражданских зданий принимаем энергетический подход к разрушению бетона, который по предложению профессора В.М. Бондаренко [129] необходимо применять для режимно нагруженных железобетонных конструкций. Согласно данному подходу, учет режимности нагружения основан на постулате о сохранении в качестве постоянной величины в течение времени удельной потенциальной энергии деформирования материала к моменту его разрушения:

$$W_{\text{эт.}}^0 = W_{\text{дл.}}^0 = \text{const} \quad , \quad (3.1)$$

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

Энергетический подход к разрушению бетона при сжатии и растяжении в том или ином виде применяли также и другие ученые [126, 130-133].

3.1.1. Гипотезы и допущения для получения диаграмм деформирования бетона при кратковременном и длительном неоднородном сжатии

Для определения параметров при кратковременном нагружении приняты следующие гипотезы и допущения [133]:

– предельное значение удельной энергии деформирования бетона при неоднородном сжатии (что соответствует сжатой зоне сечения элемента на этапе исчерпания его прочности) равно удельной энергии, накапливаемой в сечении центрально сжатого стандартного бетонного образца непосредственно перед его разрушением;

– для предельной стадии деформирования бетона при неоднородном сжатии значение относительной деформации на уровне центра тяжести эпюры сжимающих напряжений равно по величине предельной относительной деформации этого бетона при центральном (эталонном) сжатии ε_{bR} ;

– критерием исчерпания прочности изгибаемого железобетонного элемента по нормальному сечению является наличие на его наиболее нагруженной сжатой грани предельной величины относительной деформации ε_{bu} с одновременным исчерпанием сопротивления бетона сжатию R_{bn} ;

– диаграмма неоднородного сжатия бетона имеет экстремум в точке с координатами $\sigma_b = R_{bn}$ и $\varepsilon_b = \varepsilon_{bu}$.

Для определения параметров бетона при длительном нагружении принимаем следующие гипотезы и допущения:

– начальные модули упругости бетона при неоднородном кратковременном и длительном сжатии равны между собой;

– касательный модуль деформаций в предельной точке диаграммы неоднородного длительного сжатия равен нулю;

– предельные величины относительной деформации бетонов при неоднородном длительном сжатии принимаются различными в зависимости от их классов по прочности на сжатие и от принадлежности к одному из трех видов условий длительной эксплуатации;

– величина удельной энергии деформирования бетона при длительном неоднородном сжатии непосредственно перед его разрушением является константой, не зависящей от режима нагружения изгибаемого элемента [129].

3.1.2. Энергетический подход к трансформированию диаграмм деформирования бетона из центрального кратковременного сжатия в режим неоднородного сжатия

Чтобы перейти к непосредственному применению постулата [129], необходимо определить параметры нелинейных диаграмм эталонного сжатия (рисунок 3.1, поз. 1) и растяжения (рисунок 3.1, поз. 3) бетона заданного класса по прочности на сжатие.

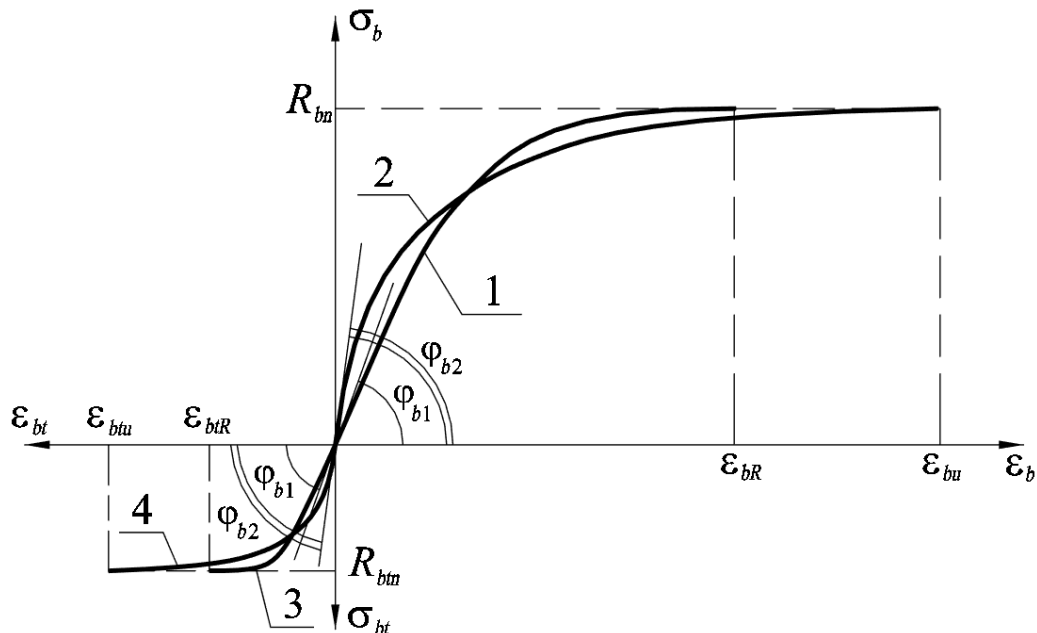


Рисунок 3.1 – Диаграммы кратковременного деформирования бетона: 1, 2 – при центральном и неоднородном сжатии; 3, 4 – то же, при растяжении: $\varphi_{b1} = \arctg(E_{b1})$; $\varphi_{b2} = \arctg(E_{b2})$ [134]

Диаграмма на рисунке 3.1 была ранее представлена в работе [134], только в качестве предельного сопротивления при сжатии и растяжении в данной работе принимаются нормативные параметры R_{bn} и R_{btm} вместо расчетных параметров R_b и R_{bt} , так как предметом исследования данной работы является, в том числе, уточнение расчетных параметров в зависимости от класса бетона при разных режимах влажностных условий.

Описание диаграммы (рисунок 3.1) можно представить в виде уравнения [125, 126, 134]:

$$\sigma_i = \frac{E_{b1} \varepsilon_i (1 + D_j \varepsilon_i)}{1 + C_j \varepsilon_i}. \quad (3.2)$$

Описание параметров функции (3.2) представлено в работе [134]. Для определения напряжений и деформаций бетона при сжатии параметры указываются с индексом $i = b$, для определения напряжений и деформаций бетона при растяжении параметры указываются с индексом $i = bt$. Для нахождения параметров диаграмм центрального сжатия бетона используются как экспериментальные данные [135], так и общепринятые теоретические предпосылки [125, 136].

На основании обобщения данных, представленных в работах [125, 135-137], для определения величины ε_{bR} применительно к тяжелому бетону классов от B10 до B60 можно рекомендовать следующую эмпирическую зависимость:

$$\varepsilon_{bR} = 0,022 \sqrt[3]{R_{bn}/E_{bn}}. \quad (3.3)$$

Значения параметров E_{b1} и параметров нелинейности D_{b1} , C_{b1} определяем с помощью уравнений (3.4–3.6) [133]. Начальный модуль упругости бетона при сжатии E_{b1} зависит от нормативного модуля E_{bn} и всегда его превышает:

$$E_{b1} = \frac{E_{bn}}{0,7} \left(1 - \frac{0,3R_{bn}}{E_{bn} \varepsilon_{bR}} \left(2 - \frac{R_{bn}}{E_{bn} \varepsilon_{bR}} \right) \right), \quad (3.4)$$

$$D_{b1} = -\frac{R_{bn}}{E_{b1} \varepsilon_{bR}^2}, \quad (3.5)$$

$$C_{b1} = \frac{E_{b1}}{R_{bn}} - \frac{2}{\varepsilon_{bR}}. \quad (3.6)$$

Теперь, зная деформативно-прочностные характеристики бетона при центральном (эталонном) сжатии, можно определить параметры диаграмм, используемых совместно с гипотезой плоских сечений для системы уравнений,

описывающих криволинейные эпюры напряжений в сжатых зонах изгибаемых и внецентренно сжатых железобетонных элементов [130, 133, 138-140]. Эти диаграммы представлены на рисунке 3.1, поз. 2 (неоднородное сжатие). Также на рисунке 3.1 можно увидеть диаграмму для неоднородного растяжения (поз. 4).

Для математического представления указанных диаграмм принимается функция, аналогичная (3.2) с учетом замены индекса 1 при неизвестных параметрах на 2. Так, для нахождения параметров диаграммы при неоднородном сжатии бетона (E_{b2} , D_{b2} , C_{b2}) и величины предельной относительной деформации (ε_{bu}) при кратковременном нагружении приняты гипотезы и допущения, представленные в п. 3.1.1.

Аналитическое отображение принятых гипотез приводит к следующей системе уравнений:

$$D_{b2} = -\frac{R_{bn}}{E_{b2} \varepsilon_{bu}^2}, \quad (3.7)$$

$$C_{b2} = \frac{E_{b2}}{R_{bn}} - \frac{2}{\varepsilon_{bu}}, \quad (3.8)$$

$$\frac{\varepsilon_{bR}}{\varepsilon_{bu}} = \frac{\int_0^x \sigma_{bz} z dz}{x \int_0^x \sigma_{bz} dz}, \quad (3.9)$$

$$\int_0^{\varepsilon_{bR}} \sigma_b d\varepsilon = \frac{1}{x} \int_0^x \int_0^{\varepsilon_{bz}} \sigma_{bz} d\varepsilon dz, \quad (3.10)$$

где D_{b2} , C_{b2} – параметры нелинейности, необходимые для построения кривых, отображающих характер неоднородного сжатия бетона; z – текущее расстояние от нейтральной оси сечения до рассматриваемого волокна эпюры напряжений в сжатой зоне бетона; x – высота сжатой зоны бетона в сечении изгибаемого железобетонного элемента; σ_{bz} – текущее напряжение в рассматриваемом волокне эпюры напряжений; ε_{bz} – текущая относительная деформация в рассматриваемом волокне эпюры деформаций в сжатой зоне бетона.

Зависимости (3.9) и (3.10) после интегрирования будут иметь следующий вид (для сжатой зоны изгибаемого железобетонного элемента):

$$\frac{\varepsilon_{bR}}{\varepsilon_{bu}} = \frac{\frac{D_{b2}\varepsilon_{bu}}{3} + \left(1 - \frac{D_{b2}}{C_{b2}}\right) \times \left[\frac{1}{2} - \frac{1}{C_{b2}\varepsilon_{bu}} \cdot \left(1 - \frac{\text{Ln}(1 + C_{b2}\varepsilon_{bu})}{C_{b2}\varepsilon_{bu}}\right) \right]}{\frac{D_{b2}\varepsilon_{bu}}{2} + \left(1 - \frac{D_{b2}}{C_{b2}}\right) \times \left[1 - \frac{\text{Ln}(1 + C_{b2}\varepsilon_{bu})}{C_{b2}\varepsilon_{bu}} \right]}, \quad (3.11)$$

$$\frac{E_{b1}\varepsilon_{bR}}{C_{b1}} \left\{ \frac{D_{b1}\varepsilon_{bR}}{2} + \left(1 - \frac{D_{b1}}{C_{b1}}\right) \left(1 - \frac{\text{Ln}(1 + C_{b1}\varepsilon_{bR})}{C_{b1}\varepsilon_{bR}}\right) \right\} = \frac{E_{b2}\varepsilon_{bu}}{C_{b2}} \left\{ \frac{D_{b2}\varepsilon_{bu}}{6} + \left(1 - \frac{D_{b2}}{C_{b2}}\right) \cdot \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{C_{b2}\varepsilon_{bu}} \left[1 - \left(1 + \frac{1}{C_{b2}\varepsilon_{bu}}\right) \cdot \text{Ln}(1 + C_{b2}\varepsilon_{bu}) \right] \right) \right\}. \quad (3.12)$$

3.1.3. Трансформирование диаграмм неоднородного сжатия бетона из состояния кратковременного деформирования в режим длительного нагружения

Представляется, что аналогичный подход можно применить для определения длительной прочности бетона, находящегося в условиях неоднородного сжатия, характеризуемого периодом нагружения образца до разрушения в течение заданного в проекте периода его эксплуатации, равного, например, 75 лет. Следует отметить, что решению указанной проблемы посвящены работы многих известных ученых [104, 129, 131, 141], но в них использовались несколько другие подходы. На рисунке 3.2 представлены зависимости, показывающие качественный вид диаграмм «напряжения – относительные деформации» для кратковременного неоднородного нагружения (рисунок 3.2, поз. 1), для длительного периода нагружения при благоприятных условиях эксплуатации (рисунок 3.2, поз. 2), то же, при нормальных условиях эксплуатации (рисунок 3.2, поз. 3), а также при неблагоприятных условиях эксплуатации (рисунок 3.2, поз. 4).

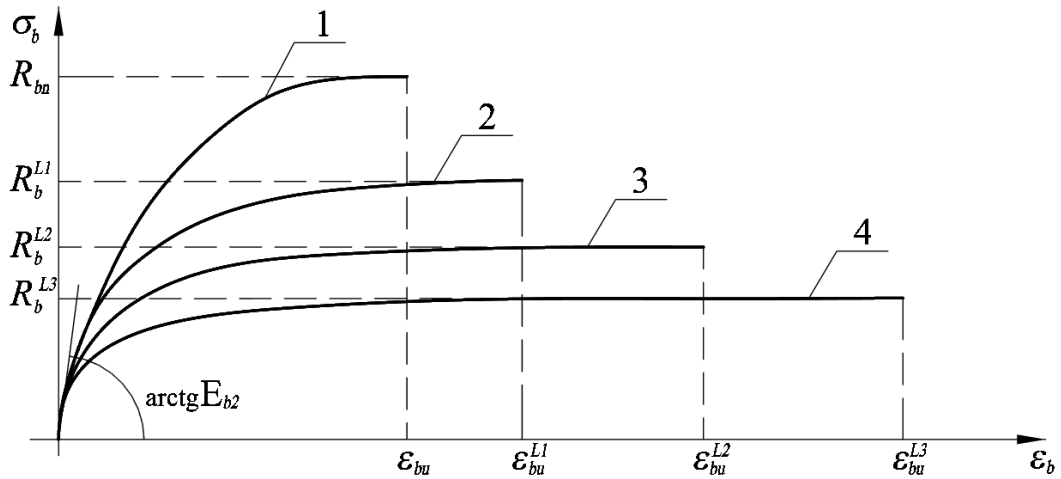


Рисунок 3.2 – Диаграммы деформирования бетона при неоднородном кратковременном (1) и длительном сжатии с учетом различных условий эксплуатации: 2 – благоприятные условия; 3 – нормальные условия; 4 – неблагоприятные условия

На рисунке 3.2 и далее в формулах принадлежность какого-либо параметра диаграммы деформирования бетона при неоднородном сжатии к его длительному нагружению обозначается верхним индексом L (например, R_b^L , C_b^L , D_b^L).

Далее определяем параметры диаграмм длительного неоднородного сжатия бетонов с учетом различных влажностных условий на завершающем этапе эксплуатации гражданских зданий с железобетонным каркасом.

Принимаются гипотезы и допущения, описанные в п. 3.1.1. Аналитически данные гипотезы и допущения отображаются в виде системы уравнений:

$$E_{b2}^{Li} = E_{b2}, \quad (3.13)$$

$$D_{b2}^{Li} = -\frac{R_b^{Li}}{E_{b2}(\epsilon_{bu}^{Li})^2}, \quad (3.14)$$

$$C_{b2}^{Li} = \frac{E_{b2}}{R_b^{Li}} - \frac{2}{\epsilon_{bu}^{Li}}, \quad (3.15)$$

$$\frac{1}{x} \int_0^x \int_0^{\epsilon_{bz}} \sigma_{bz} d\epsilon dz = \frac{1}{x_{Li}} \int_0^{x_{Li}} \int_0^{\epsilon_{bz}^{Li}} \sigma_{bz}^{Li} d\epsilon_{bz}^{Li} dz, \quad (3.16)$$

где Li – принадлежность параметра к неоднородному длительному сжатию и к одному из трех видов по условиям длительной эксплуатации ($i = 1, 2, 3$).

Последнее равенство (3.16) отражает гипотезу об инвариантности величины удельной энергии деформирования бетона при сжатии непосредственно перед его разрушением. В результате его интегрирования и после небольших преобразований получаем следующую зависимость:

$$\frac{\varepsilon_{bu}}{C_{b2}} \left\{ \frac{D_{b2}\varepsilon_{bu}}{6} + \left(1 - \frac{D_{b2}}{C_{b2}}\right) \cdot \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{C_{b2}\varepsilon_{bu}} \times \left[1 - \left(1 + \frac{1}{C_{b2}\varepsilon_{bu}}\right) \cdot \text{Ln}(1 + C_{b2}\varepsilon_{bu}) \right] \right) \right\} =$$

$$= \frac{\varepsilon_{bu}^{Li}}{C_{b2}^{Li}} \left\{ \frac{D_{b2}^{Li}\varepsilon_{bu}^{Li}}{6} + \left(1 - \frac{D_{b2}^{Li}}{C_{b2}^{Li}}\right) \times \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{C_{b2}^{Li}\varepsilon_{bu}^{Li}} \left[1 - \left(1 + \frac{1}{C_{b2}^{Li}\varepsilon_{bu}^{Li}}\right) \cdot \text{Ln}(1 + C_{b2}^{Li}\varepsilon_{bu}^{Li}) \right] \right) \right\}. \quad (3.17)$$

Первое из уравнений полученной системы (3.13) по существу является тождеством, и его можно исключить из рассмотрения. В оставшихся трех уравнениях (3.14), (3.15), (3.17) неизвестными являются четыре параметра (D_{b2}^{Li} , C_{b2}^{Li} , R_b^{Li} , ε_{bu}^{Li}). В качестве недостающего четвертого уравнения принимаем эмпирическую зависимость для определения величины предельной относительной деформации бетона ε_{bu}^{Li} , позволяющую учесть класс тяжелого бетона по прочности на сжатие от $B10$ до $B60$, а также принадлежность к одному из трех диапазонов влажностных условий его длительной эксплуатации. Для построения такой зависимости используем алгебраическое выражение, аналогичное (3.3), в котором числовые коэффициенты подобраны таким образом, чтобы для каждого вида условий эксплуатации усредненное значение предельной относительной деформации бетона ε_{bu}^{Li} соответствовало рекомендациям, приведенным в [96]:

– для благоприятных условий длительной эксплуатации:

$$\varepsilon_{bu}^{L1} = 0,0465 \sqrt[3]{R_{bn}/E_{bn}}, \quad (3.18)$$

– при нормальных условиях эксплуатации:

$$\varepsilon_{bu}^{L2} = 0,0531 \sqrt[3]{R_{bn}/E_{bn}}, \quad (3.19)$$

– для неблагоприятных условий эксплуатации:

$$\varepsilon_{bu}^{L3} = 0,0620 \sqrt[3]{R_{bn}/E_{bn}} . \quad (3.20)$$

Для совместного решения уравнений используется разработанная программа для ЭВМ (Приложение А) с помощью способа, представленного в ноу-хау (Приложение В). Были рассчитаны искомые величины деформативно-прочностных характеристик тяжелых бетонов различных классов по прочности на сжатие для каждого из трех диапазонов влажностных условий их эксплуатации (E_{b2} , R_b^{Li} , ε_{bu}^{Li}). Некоторые результаты расчетов, выполненных с помощью этой программы, представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Результаты расчетов деформативно-прочностных характеристик бетонов применительно к неоднородному длительному сжатию с учетом влажностных условий на завершающем этапе эксплуатации гражданских зданий

Класс бетона	R_{bn} , МПа	E_{bn} , МПа	$\frac{E_{b1}}{E_{b2}}$ (МПа)	$\frac{\varepsilon_{bR}}{\varepsilon_{bu}}$	ε_{bu}^{L1}	ε_{bu}^{L2}	ε_{bu}^{L3}	R_b^{L1} , МПа	R_b^{L2} , МПа	R_b^{L3} , МПа
								K_{Rb}^{L1}	K_{Rb}^{L2}	K_{Rb}^{L3}
B10	7,5	19000	$\frac{23650}{57120}$	$\frac{0,00161}{0,00301}$	0,00341	0,00390	0,00455	$\frac{6,4}{0,86}$	$\frac{5,5}{0,74}$	$\frac{4,6}{0,62}$
B15	11,0	24000	$\frac{29480}{71980}$	$\frac{0,00170}{0,00315}$	0,00358	0,00409	0,00478	$\frac{9,4}{0,85}$	$\frac{8,0}{0,73}$	$\frac{6,7}{0,61}$
B20	15,0	27500	$\frac{33220}{82090}$	$\frac{0,00180}{0,00332}$	0,00380	0,00434	0,00507	$\frac{12,7}{0,85}$	$\frac{10,8}{0,72}$	$\frac{9,0}{0,60}$
B25	18,5	30000	$\frac{35780}{89120}$	$\frac{0,00187}{0,00345}$	0,00396	0,00452	0,00528	$\frac{15,6}{0,84}$	$\frac{13,2}{0,71}$	$\frac{11,0}{0,59}$
B30	22,0	32500	$\frac{38380}{96110}$	$\frac{0,00193}{0,00355}$	0,00408	0,00466	0,00544	$\frac{18,4}{0,84}$	$\frac{15,6}{0,71}$	$\frac{13,0}{0,59}$
B35	25,5	34500	$\frac{40340}{101510}$	$\frac{0,00199}{0,00364}$	0,00420	0,00480	0,00561	$\frac{21,2}{0,83}$	$\frac{18,0}{0,70}$	$\frac{15,0}{0,59}$
B40	29,0	36000	$\frac{41670}{105310}$	$\frac{0,00205}{0,00374}$	0,00433	0,00494	0,00577	$\frac{24,0}{0,83}$	$\frac{20,3}{0,70}$	$\frac{16,9}{0,58}$
B45	32,0	37000	$\frac{42470}{107640}$	$\frac{0,00210}{0,00381}$	0,00443	0,00506	0,00591	$\frac{26,3}{0,82}$	$\frac{22,3}{0,70}$	$\frac{18,5}{0,58}$
B50	36,0	38000	$\frac{43140}{109680}$	$\frac{0,00216}{0,00392}$	0,00457	0,00522	0,00609	$\frac{29,4}{0,82}$	$\frac{24,9}{0,69}$	$\frac{20,6}{0,57}$
B55	39,5	39000	$\frac{43900}{111820}$	$\frac{0,00221}{0,00399}$	0,00467	0,00533	0,00623	$\frac{32,1}{0,81}$	$\frac{27,1}{0,69}$	$\frac{22,4}{0,57}$
B60	43,0	39500	$\frac{44060}{112370}$	$\frac{0,00226}{0,00408}$	0,00478	0,00546	0,00638	$\frac{34,7}{0,81}$	$\frac{29,3}{0,68}$	$\frac{24,2}{0,56}$

Анализ представленных в таблице 3.2 результатов показывает, что величины предельных относительных деформаций при центральном (эталонном) сжатии ε_{bR} , найденные по предложенной формуле (3.3), возрастают от 0,00161 для бетона класса *B10* до 0,00226 для бетона *B60*. То есть принятое в [96] постоянное значение $\varepsilon_{b0} = 0,002$ примерно соответствует классу бетона *B35*.

Значения предельных относительных деформаций бетона при неоднородном кратковременном сжатии ε_{bu} также возрастают с ростом прочности бетона и укладываются в диапазон от 0,00301 до 0,00408. Таким образом, согласно приведенным в таблице 3.2 данным, нормируемая величина $\varepsilon_{b2} = 0,0035$ соответствует классу бетона *B30*.

Соответственно, отношение анализируемых параметров ($\varepsilon_{bu} / \varepsilon_{bR}$) также не является постоянной величиной, которая уменьшается от 1,87 для бетона класса *B10* до 1,80 для *B60*.

Указанные выше тенденции сохраняются и для величин предельных относительных деформаций бетона при неоднородном длительном сжатии ε_{bu}^{Li} (где $i = 1, 2, 3$). При этом для благоприятных условий эксплуатации бетона значения параметров ε_{bu}^{L1} оказались в 1,33 раза меньше по отношению к соответствующим величинам ε_{bu}^{L3} , полученным применительно к неблагоприятным условиям эксплуатации. Рекомендованные в [96] усредненные значения предельной относительной деформации бетона для трех видов условий эксплуатации наиболее близко соответствуют классу *B35*.

Что касается представленных в таблице 3.2 величин предельных сопротивлений бетонов при длительном неоднородном сжатии R_b^{Li} (где $i = 1, 2, 3$), то можно отметить, что усредненный коэффициент снижения прочности, принятый в [96] равным 0,69, можно применять только к бетону, эксплуатация которого осуществлялась в нормальных условиях. При благоприятных условиях эксплуатации указанный коэффициент оказался заметно выше (от 0,81 при классе бетона *B60* до 0,86 при *B10*). А для неблагоприятных условий эксплуатации наблюдается обратная тенденция: все рассчитанные коэффициенты оказались

меньше, чем усредненный коэффициент снижения прочности, принятый в [96] равным 0,69. В частности, указанный коэффициент изменяется от 0,56 для класса бетона $B60$ до 0,62 при $B10$.

Таким образом, параметры предельного сопротивления и относительных деформаций для трех диапазонов влажностных условий эксплуатации были уточнены для разных классов бетона и могут применяться для дальнейших расчетов.

3.2. Параметры диаграмм центрального и неоднородного растяжения бетона железобетонных конструкций с учетом различных влажностных условий окружающей среды при его длительной эксплуатации

Аналогично расчету параметров для сжатой зоны бетона, для определения параметров, характеризующих растяжение бетона, принимаются усредненные значения предельных относительных деформаций при длительном осевом растяжении (ε_{bt0}) и при длительном неоднородном растяжении (ε_{bt2}). Параметр ε_{bt2} соответствует наибольшей величине относительной деформации в растянутой зоне бетона изгибаемого или внецентренно сжатого длительно нагруженного элемента при образовании первой трещины в этой зоне [142]. Характеристики бетона при длительном растяжении R_{bt} приняты без учета градации по диапазонам влажностных условий, а отношение γ_{b1}/γ_b составляет 0,60.

На основании обобщения данных, представленных в работах [125, 135-137], для определения величины ε_{btR} применительно к тяжелому бетону классов от $B10$ до $B60$ можно рекомендовать следующую эмпирическую зависимость:

$$\varepsilon_{btR} = 0,0575 \sqrt[3]{(R_{bt}/E_{bn})^2}. \quad (3.21)$$

Начальный модуль упругости E_{b1} принимается одинаковым как при растяжении, так и при сжатии бетона одного и того же класса. Параметры нелинейности D_{bt1} и C_{bt1} , необходимые для построения кривых, характеризующих центральное растяжение бетона, определяются по зависимостям, аналогичным (3.5) и (3.6):

$$D_{bt1} = -\frac{R_{btm}}{E_{b1} \varepsilon_{btR}^2}, \quad (3.22)$$

$$C_{bt1} = \frac{E_{b1}}{R_{btm}} - \frac{2}{\varepsilon_{btR}}. \quad (3.23)$$

При нахождении неизвестных параметров (D_{bt2}, C_{bt2}) диаграммы при неоднородном растяжении бетона и величины предельной относительной деформации (ε_{btu}) при кратковременном нагружении [134] используется тот же подход, что и при определении параметров (D_{b2}, C_{b2}) . Начальный модуль упругости E_{b2} , найденный из решения системы нелинейных уравнений (3.7), (3.8), (3.11), (3.12) для неоднородного сжатия бетона, остается таким же для неоднородного растяжения. В связи с принятием указанного условия система разрешающих уравнений базируется не на четырех, а на трех зависимостях с учетом замены переменных, связанных со спецификой неоднородного растяжения [134]:

$$D_{bt2} = -\frac{R_{btm}}{E_{b2} \varepsilon_{btu}^2}, \quad (3.24)$$

$$C_{bt2} = \frac{E_{b2}}{R_{btm}} - \frac{2}{\varepsilon_{btu}}, \quad (3.25)$$

$$\begin{aligned} \frac{E_{b1} \varepsilon_{btR}}{C_{bt1}} \left\{ \frac{D_{bt1} \varepsilon_{btR}}{2} + \left(1 - \frac{D_{bt1}}{C_{bt1}} \right) \left(1 - \frac{\text{Ln}(1 + C_{bt1} \varepsilon_{btR})}{C_{bt1} \varepsilon_{btR}} \right) \right\} = \frac{E_{b2} \varepsilon_{btu}}{C_{bt2}} \left\{ \frac{D_{bt2} \varepsilon_{btu}}{6} + \right. \\ \left. + \left(1 - \frac{D_{bt2}}{C_{bt2}} \right) \cdot \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{C_{bt2} \varepsilon_{btu}} \left[1 - \left(1 + \frac{1}{C_{bt2} \varepsilon_{btu}} \right) \cdot \text{Ln}(1 + C_{bt2} \varepsilon_{btu}) \right] \right) \right\}. \quad (3.26) \end{aligned}$$

Для нахождения неизвестных параметров диаграмм при неоднородном длительном растяжении бетонов $(D_{bt2}^{Li}, C_{bt2}^{Li}, R_{bt}^{Li}, \varepsilon_{btu}^{Li})$ с учетом различных влажностных условий на завершающем этапе эксплуатации гражданских зданий с железобетонным каркасом, принимается, что начальный модуль упругости бетона E_{b2} остается неизменным по величине для неоднородного длительного

растяжения. Применительно к указанным видам диаграмм деформирования бетонов принимается система уравнений, аналогичных (3.14), (3.15), (3.17) с учетом изменения обозначений параметров, связанных со спецификой неоднородного растяжения:

$$D_{bt2}^{Li} = -\frac{R_{bt}^{Li}}{E_{b2}(\varepsilon_{btu}^{Li})^2}, \quad (3.27)$$

$$C_{bt2}^{Li} = \frac{E_{b2}}{R_{bt}^{Li}} - \frac{2}{\varepsilon_{btu}^{Li}}, \quad (3.28)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\varepsilon_{btu}}{C_{bt2}} \left\{ \frac{D_{bt2} \varepsilon_{btu}}{6} + \left(1 - \frac{D_{bt2}}{C_{bt2}} \right) \cdot \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{C_{bt2} \varepsilon_{btu}} \times \left[1 - \left(1 + \frac{1}{C_{bt2} \varepsilon_{btu}} \right) \cdot \text{Ln}(1 + C_{bt2} \varepsilon_{btu}) \right] \right) \right\} = \\ & = \frac{\varepsilon_{btu}^{Li}}{C_{bt2}^{Li}} \left\{ \frac{D_{bt2}^{Li} \varepsilon_{btu}^{Li}}{6} + \left(1 - \frac{D_{bt2}^{Li}}{C_{bt2}^{Li}} \right) \times \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{C_{bt2}^{Li} \varepsilon_{btu}^{Li}} \left[1 - \left(1 + \frac{1}{C_{bt2}^{Li} \varepsilon_{btu}^{Li}} \right) \cdot \text{Ln}(1 + C_{bt2}^{Li} \varepsilon_{btu}^{Li}) \right] \right) \right\}. \quad (3.29) \end{aligned}$$

Получаем в итоге систему трех уравнений с четырьмя неизвестными параметрами (D_{bt2}^{Li} , C_{bt2}^{Li} , R_{bt}^{Li} , ε_{btu}^{Li}), что не позволяет найти их значения. В качестве недостающего четвертого уравнения принимаем эмпирическую зависимость для определения величины предельной относительной деформации бетона ε_{btu}^{Li} , позволяющую учесть класс тяжелого бетона по прочности на сжатие от $B10$ до $B60$, а также принадлежность к одному из трех диапазонов влажностных условий при длительной эксплуатации. Для построения такой зависимости используем алгебраическое выражение, аналогичное (3.21), в котором числовые коэффициенты подобраны таким образом, чтобы для каждого из трех диапазонов влажностных условий эксплуатации усредненное значение предельной относительной деформации бетона ε_{btu}^{Li} соответствовало рекомендациям, приведенным в [96]:

– для благоприятных условий длительной эксплуатации:

$$\varepsilon_{btu}^{L1} = 0,1834 \sqrt[3]{(R_{btm}/E_{bn})^2}; \quad (3.30)$$

– при нормальных условиях эксплуатации:

$$\varepsilon_{btu}^{L2} = 0,2105 \sqrt[3]{(R_{btm}/E_{bn})^2}; \quad (3.31)$$

– для неблагоприятных условий эксплуатации:

$$\varepsilon_{btu}^{L3} = 0,2445 \sqrt[3]{(R_{btm}/E_{bn})^2}. \quad (3.32)$$

Теперь решение системы уравнений (3.27–3.30) становится возможным.

С применением разработанной программы для ЭВМ были рассчитаны искомые величины деформативно-прочностных характеристик тяжелых бетонов различных классов по прочности на растяжение для трех диапазонов влажностных условий их эксплуатации (R_{bt}^{Li} , ε_{btu}^{Li}). Некоторые результаты представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Результаты расчетов деформативно-прочностных характеристик бетонов применительно к неоднородному длительному растяжению с учетом влажностных условий на завершающем этапе эксплуатации гражданских зданий

Класс бетона	R_{btm} , МПа	$\frac{\varepsilon_{btR}}{\varepsilon_{btu}}$	ε_{btu}^{L1}	ε_{btu}^{L2}	ε_{btu}^{L3}	R_{bt}^{L1} , МПа	R_{bt}^{L2} , МПа	R_{bt}^{L3} , МПа
						K_{Rbt}^{L1}	K_{Rbt}^{L2}	K_{Rbt}^{L3}
B10	0,85	<u>0,0000724</u>	0,000231	0,000265	0,000308	<u>0,406</u>	<u>0,346</u>	<u>0,291</u>
		0,000131				0,478	0,407	0,342
B15	1,10	<u>0,0000736</u>	0,000235	0,000270	0,000313	<u>0,523</u>	<u>0,445</u>	<u>0,375</u>
		0,000132				0,475	0,404	0,341
B20	1,35	<u>0,0000771</u>	0,000246	0,000282	0,000328	<u>0,637</u>	<u>0,541</u>	<u>0,456</u>
		0,000138				0,472	0,401	0,338
B25	1,55	<u>0,0000797</u>	0,000254	0,000292	0,000339	<u>0,726</u>	<u>0,617</u>	<u>0,520</u>
		0,000142				0,468	0,398	0,336
B30	1,75	<u>0,0000820</u>	0,000262	0,000300	0,000349	<u>0,816</u>	<u>0,693</u>	<u>0,584</u>
		0,000146				0,466	0,396	0,334
B35	1,95	<u>0,0000847</u>	0,000270	0,000310	0,000360	<u>0,903</u>	<u>0,768</u>	<u>0,646</u>
		0,000150				0,463	0,394	0,331
B40	2,10	<u>0,0000865</u>	0,000276	0,000317	0,000368	<u>0,968</u>	<u>0,823</u>	<u>0,692</u>
		0,000153				0,461	0,392	0,330
B45	2,25	<u>0,0000889</u>	0,000284	0,000326	0,000378	<u>1,032</u>	<u>0,877</u>	<u>0,738</u>
		0,000157				0,459	0,390	0,328
B50	2,45	<u>0,0000924</u>	0,000295	0,000338	0,000393	<u>1,116</u>	<u>0,947</u>	<u>0,797</u>
		0,000163				0,456	0,386	0,325
B55	2,60	<u>0,0000945</u>	0,000302	0,000346	0,000402	<u>1,178</u>	<u>1,000</u>	<u>0,841</u>
		0,000166				0,4531	0,385	0,324
B60	2,75	<u>0,0000973</u>	0,000310	0,000356	0,000414	<u>1,239</u>	<u>1,051</u>	<u>0,884</u>
		0,000170				0,451	0,382	0,322

Приведенные в таблице 3.3 результаты расчетов деформативно-прочностных характеристик бетонов применительно к неоднородному длительному растяжению показывают тенденции, аналогичные тем, что выявлены при неоднородном сжатии (см. таблицу 3.2).

Значения предельных относительных деформаций бетона при неоднородном кратковременном растяжении ε_{btu} также возрастают с ростом прочности бетона и укладываются в диапазон от 0,000131 до 0,000170. Таким образом, согласно представленным в таблице 3.3 результатам, приведенная в [96] усредненная величина $\varepsilon_{bt2} = 0,00015$ соответствует классу бетона *B35*.

Отношение анализируемых параметров ($\varepsilon_{btu} / \varepsilon_{btR}$) не является постоянной величиной, которая изменяется от 1,81 для бетона класса *B10* до 1,75 для *B60*. Аналогичные тенденции сохраняются и для величин предельных относительных деформаций бетона при неоднородном длительном растяжении ε_{btu}^{Li} (где $i = 1, 2, 3$). Рекомендованные в [96] усредненные значения предельной относительной деформации бетонов для трех диапазонов влажностных условий наиболее близко соответствуют классу *B35*.

Анализируя представленные в таблице 3.3 величины предельных сопротивлений бетонов при неоднородном длительном растяжении R_{bt}^{Li} (где $i = 1, 2, 3$), можно отметить, что усредненный коэффициент снижения прочности, принятый в [96] равным 0,60, существенно завышен даже для бетона, эксплуатация которого осуществлялась в благоприятных условиях, то есть при постоянной относительной влажности воздуха в окружающей среде свыше 75 %. В частности, рассчитанные коэффициенты K_{Rbt}^{L1} для этих влажностных условий эксплуатации оказались заметно ниже 0,60 и находились в диапазоне от 0,451 при классе бетона *B60* до 0,478 при *B10*. А для неблагоприятных условий эксплуатации (относительная влажность воздуха ниже 40 %) значения коэффициентов K_{Rbt}^{L3} оказались еще ниже и изменялись в интервале от 0,322 для класса бетона *B60* до 0,342 при *B10*.

3.3. Определение параметров напряженно-деформированного состояния длительно эксплуатируемых железобетонных конструкций в составе каркасных гражданских зданий в заданный момент времени с учетом различных влажностных условий окружающей среды

3.3.1. Определение деформативно-прочностных характеристик бетона при неоднородном сжатии в заданный момент времени эксплуатации соответствующей железобетонной конструкции с учетом различных влажностных условий окружающей среды

Изменение предельного сопротивления бетона в диапазоне от предельного сопротивления при кратковременном неоднородном сжатии R_{bn} до предельного сопротивления при длительном неоднородном сжатии при неблагоприятных влажностных условиях эксплуатации R_b^{L3} происходит по нелинейной кривой, показанной на рисунке 3.3 (поз. 5). Кривая проходит через промежуточные точки с координатами, соответствующими значениям предельного сопротивления и относительной деформации при длительном неоднородном сжатии при благоприятных влажностных условиях эксплуатации R_b^{L1} , а также при длительном неоднородном сжатии в случае нормальных влажностных условиях эксплуатации R_b^{L2} .

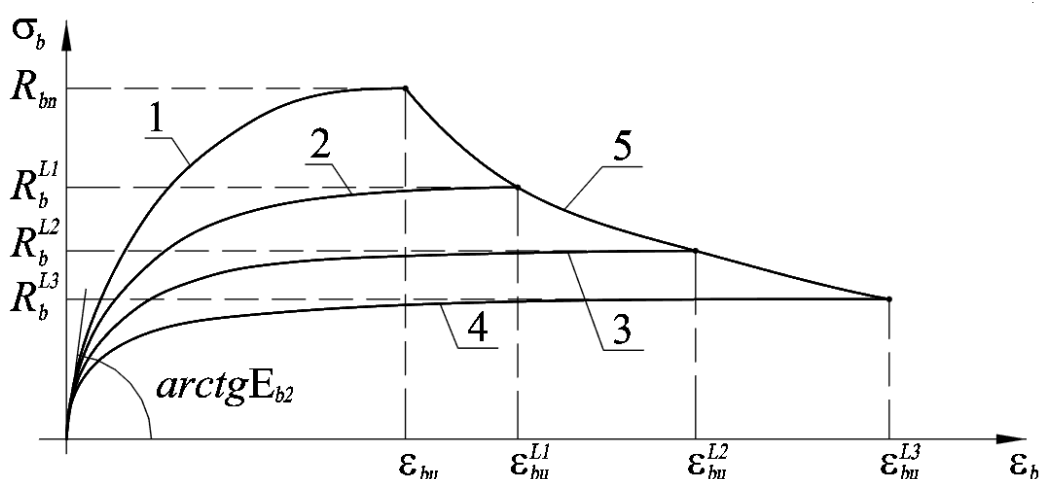


Рисунок 3.3 – Диаграммы деформирования бетона при неоднородном кратковременном (1) и длительном сжатии с учетом различных влажностных условий эксплуатации: 2 – благоприятные условия; 3 – нормальные условия; 4 – неблагоприятные условия; 5 – изменение предельного сопротивления бетона при неоднородном сжатии в зависимости от его предельной относительной деформации

Аналитическое описание диаграммы применительно к сроку эксплуатации можно представить следующим образом:

$$R_{b,i} = \frac{L_{bc} + K_{bc} \varepsilon_{bu,i}}{1 + N_{bc} \varepsilon_{bu,i} + M_{bc} \varepsilon_{bu,i}^2}, \quad (3.33)$$

где $R_{b,i}^j$ – предельное сопротивление на текущий момент времени, МПа ($j = L1, L2, L3$); $\varepsilon_{bu,i}$ – текущее значение относительной деформации.

Коэффициенты нелинейности K_{bc} , M_{bc} , L_{bc} , N_{bc} подбираются в зависимости от класса бетона для благоприятных, нормальных и неблагоприятных влажностных условий ($i = 1, 2, 3$). В таблице 3.4 представлены полученные значения коэффициентов для разных классов бетона.

Таблица 3.4 – Значения коэффициентов нелинейности K_{bc} , M_{bc} , L_{bc} , N_{bc} для классов бетона B10 – B60

Параметр	Класс бетона					
	B10	B20	B30	B40	B50	B60
L_{bc}	-29	-51	-69	-84	-97	-109
K_{bc}	-2768	-2692	-2021	-1169	-211	592
N_{bc}	-1543	-1292	-1149	-1044	-954	-882
M_{bc}	-141621	-62574	-29303	-10982	533	6700

На основании предпосылок ведущих ученых в области изучения длительной прочности бетона и железобетона [103, 104, 137, 141], была разработана зависимость, показывающая изменение прочности бетона при неоднородном сжатии в зависимости от продолжительности эксплуатации. Аналитически зависимость описана следующим выражением:

$$R_{b,i}^j = \frac{L_i + K_i t}{1 + N_i t + M_i t^2}, \quad (3.34)$$

где t – продолжительность эксплуатации, годы.

Коэффициенты нелинейности K_i , M_i , L_i , N_i подбираются в зависимости от класса бетона по прочности на сжатие для благоприятных, нормальных и неблагоприятных влажностных условий ($i = 1, 2, 3$). В таблице 3.5 представлены полученные значения коэффициентов для разных классов бетона.

Таблица 3.5 – Значения коэффициентов K_{I-3} , M_{I-3} , L_{I-3} , N_{I-3} для определения величин предельных сопротивлений бетона при сжатии для классов $B10$ – $B60$

Параметр	Класс бетона					
	$B10$	$B20$	$B30$	$B40$	$B50$	$B60$
L_1	7,5	15	22	29	36	43
K_1	-0,04614	-0,083715	-0,117074	-0,144573	-0,17500	-0,19489
N_1	-0,00610	-0,005372	-0,005196	-0,004923	-0,00499	-0,00460
M_1	6,07E-06	7,47E-06	9,08E-06	1,09E-05	1,27E-05	1,38E-05
L_2	7,5	15	22	29	36	43
K_2	-0,0479	-0,087349	-0,120982	-0,153840	-0,187240	-0,21256
N_2	-0,0064	-0,005798	-0,005447	-0,005461	-0,005470	-0,00514
M_2	1,35E-05	1,655E-05	1,885E-05	2,174E-05	2,408E-05	2,56E-05
L_3	7,5	15	22	29	36	43
K_3	-0,05039	-0,087919	-0,121643	-0,153199	-0,189131	-0,22477
N_3	-0,00643	-0,005233	-0,004904	-0,004704	-0,004870	-0,00523
M_3	1,78E-05	2,131E-05	2,470E-05	2,799E-05	3,164E-05	3,71E-05

Срок эксплуатации гражданских зданий, не относящихся к категории уникальных, варьируется от 50 до 100 лет. На рисунке 3.4 показаны графики изменения предельного сопротивления бетона R_b класса $B30$ от времени и влажностных условий для трех вариантов эксплуатации до $t_{max} = 100$ лет. Расчет был выполнен с помощью разработанной программы для ЭВМ (Приложение А) [143].

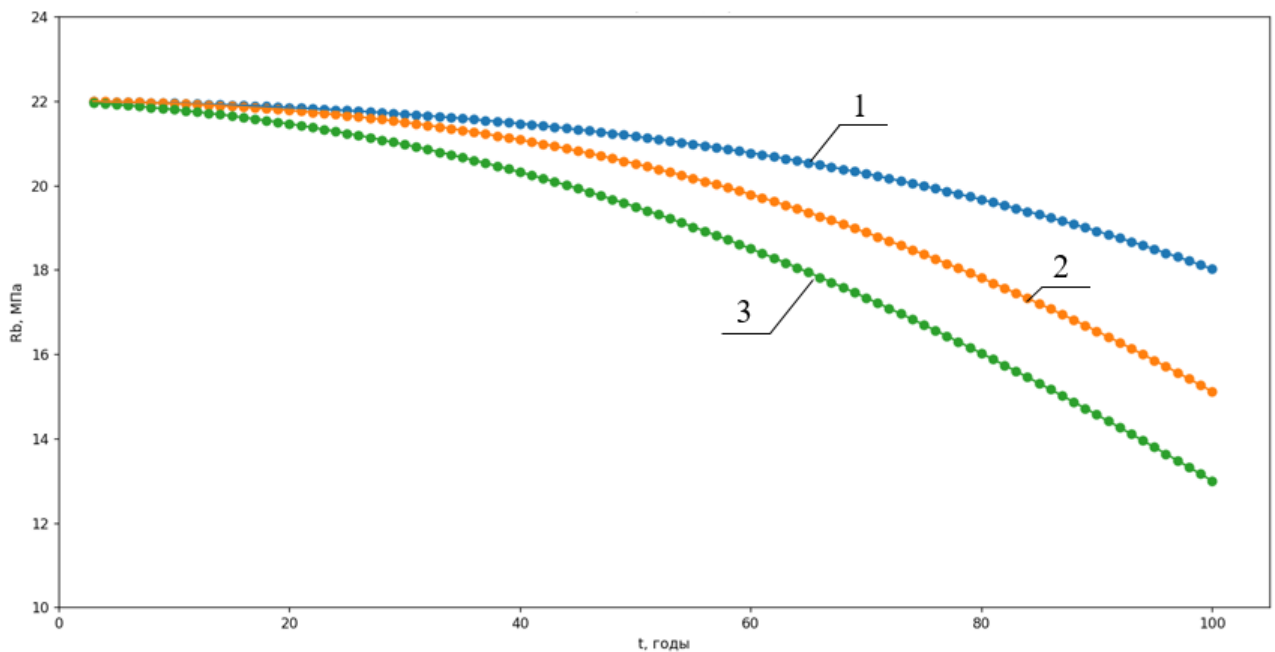


Рисунок 3.4 – Изменение предельного сопротивления бетона класса $B30$ от времени эксплуатации в благоприятных (1), нормальных (2) и неблагоприятных (3) условиях по относительной влажности в помещении до $t = 100$ лет

С помощью горизонтальной прямой, проходящей через точку $0,69R_{bn}$, получаемую из отношения γ_{b1}/γ_b , можно определить максимальную продолжительность эксплуатации для трех вариантов относительной влажности в помещении (рисунок 3.5, поз. 5).

С учетом того, что относительная влажность в помещении в течение срока эксплуатации объекта капитального строительства меняется, на основании усредненного значения можно рассчитать промежуточное значение сопротивления R_b^φ с помощью интерполяции или экстраполяции. Если усредненное значение находится в диапазоне относительной влажности до 40 %, рассчитать промежуточное значение можно по формуле:

$$R_b^\varphi = R_b^{L3} - (40\% - \varphi_{current}) \cdot \frac{(R_b^{L2} - R_b^{L3})}{(75\% - 40\%)}, \quad (3.35)$$

где $\varphi_{current}$ – усредненное значение относительной влажности в помещении на момент времени t .

Если усредненное значение $\varphi_{current}$ находится в диапазоне относительной влажности от 40 до 75 %, рассчитать промежуточное значение можно по формуле:

$$R_b^\varphi = R_b^{L2} - (75\% - \varphi_{current}) \cdot \frac{(R_b^{L2} - R_b^{L3})}{(75\% - 40\%)}. \quad (3.36)$$

Если усредненное значение $\varphi_{current}$ находится в диапазоне относительной влажности выше 75 %, но не более 100 %, рассчитать промежуточное значение можно по формуле:

$$R_b^\varphi = R_b^{L1} - (100\% - \varphi_{current}) \cdot \frac{(R_b^{L1} - R_b^{L2})}{(100\% - 75\%)}. \quad (3.37)$$

На рисунке 3.5, поз. 4 показан график изменения предельного сопротивления бетона класса B30 от времени эксплуатации по усредненному значению относительной влажности в помещении – 60 %. На рисунке 3.6 показано то же, но для бетона класса B60.

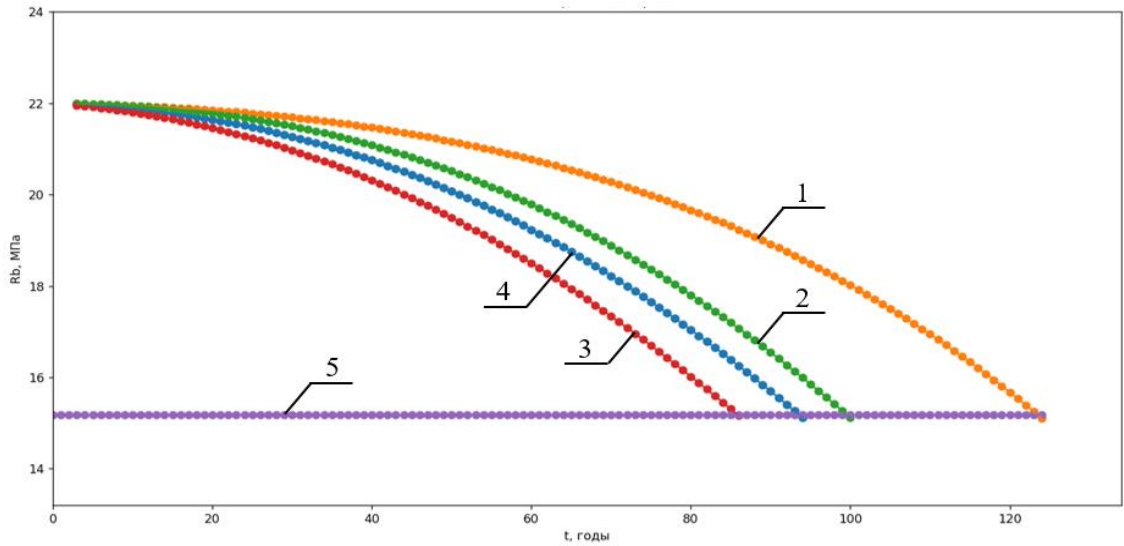


Рисунок 3.5 – Изменение предельного сопротивления сжатию бетона класса $B30$ от времени: 1 – при эксплуатации в благоприятных условиях; 2 – при эксплуатации в нормальных условиях; 3 – при эксплуатации в неблагоприятных условиях; 4 – при эксплуатации при промежуточном значении относительной влажности (60 %); 5 – горизонтальная прямая, соответствующая уровню $0,69R_{bn} = 15,18 \text{ МПа}$

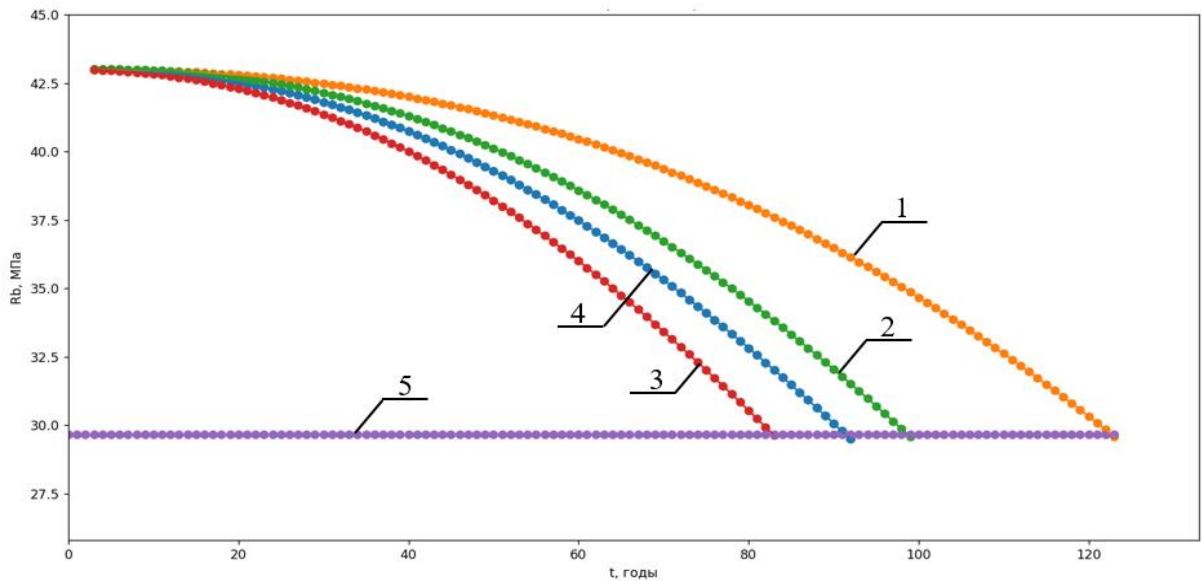


Рисунок 3.6 – Изменение предельного сопротивления бетона класса $B60$ от времени: 1 – при эксплуатации в благоприятных условиях; 2 – при эксплуатации в нормальных условиях; 3 – при эксплуатации в неблагоприятных условиях; 4 – при эксплуатации при промежуточном значении относительной влажности (60 %); 5 – горизонтальная прямая, соответствующая уровню $0,69R_{bn} = 29,67 \text{ МПа}$

Сроки исчерпания прочности бетона класса $B30$ составили: 125 лет для благоприятных условий эксплуатации, 100 лет – для нормальных условий и 86 лет – для неблагоприятных условий эксплуатации. Сроки исчерпания прочности бетона класса $B60$, соответственно, составили 123, 99 и 83 года.

С помощью зависимости (3.34) можно определить предельное сопротивление R_b^φ в момент времени t_i , не превышающий t_{max} . По полученному R_b^φ с помощью зависимости (3.33) можно определить соответствующую предельную величину относительной деформации бетона при длительном неоднородном сжатии.

В таблице 3.6 показаны прогнозируемые величины предельных сопротивлений бетона класса $B30$ при сжатии и его относительных деформаций в зависимости от усредненной влажности воздуха в помещении и от времени эксплуатации. В таблице 3.7 показаны те же параметры, но для бетона класса $B60$.

Таблица 3.6 – Прогнозируемые величины предельных сопротивлений и относительных деформаций бетона класса $B30$ при сжатии в зависимости от влажности воздуха в помещении и времени эксплуатации

Параметр	Относительная влажность, %	Период эксплуатации t_i , годы					
		30	40	50	60	70	80
R_{bi}^φ	40	20,97	20,32	19,49	18,50	17,34	16,02
$\varepsilon_{bui}^\varphi$		0,00368	0,00377	0,00390	0,00406	0,00428	0,00457
R_{bi}^φ	60	21,27	20,75	20,08	19,24	18,22	17,04
$\varepsilon_{bui}^\varphi$		0,00367	0,00373	0,00383	0,00396	0,00415	0,00436
R_{bi}^φ	80	21,54	21,16	20,65	19,98	19,16	18,18
$\varepsilon_{bui}^\varphi$		0,00361	0,00367	0,00374	0,00386	0,00399	0,00414

Таблица 3.7 – Прогнозируемые величины предельных сопротивлений и относительных деформаций бетона класса $B60$ при сжатии в зависимости от влажности воздуха в помещении и времени эксплуатации

Параметр	Относительная влажность, %	Период эксплуатации t_i , годы					
		30	40	50	60	70	80
R_{bi}^φ	40	41,37	40,00	38,21	36,00	33,43	30,55
$\varepsilon_{bui}^\varphi$		0,00423	0,00435	0,00450	0,00469	0,00496	0,00534
R_{bi}^φ	60	41,82	40,74	39,30	37,48	35,31	32,83
$\varepsilon_{bui}^\varphi$		0,00419	0,00427	0,00438	0,00453	0,00477	0,00504
R_{bi}^φ	80	42,22	41,44	40,36	38,97	37,26	35,24
$\varepsilon_{bui}^\varphi$		0,00415	0,00423	0,00431	0,00442	0,00458	0,00477

Диаграммы деформирования бетона класса $B30$ при неоднородном сжатии в зависимости от усредненной относительной влажности воздуха в помещении 40,

60, 80 % и от периода эксплуатации железобетонных конструкций в гражданских зданиях показаны на рисунках 3.7-3.9, соответственно.

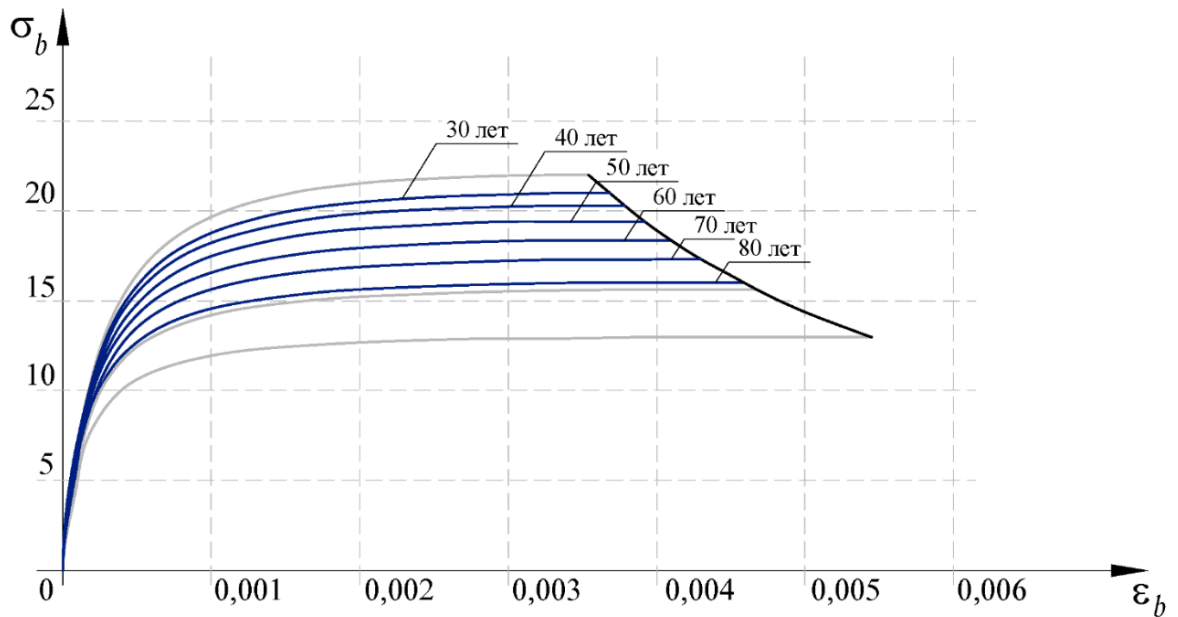


Рисунок 3.7 – Диаграммы деформирования бетона класса *B30* при неоднородном сжатии для относительной влажности воздуха в помещении 40 % в периоды эксплуатации железобетонных конструкций от 30 до 80 лет

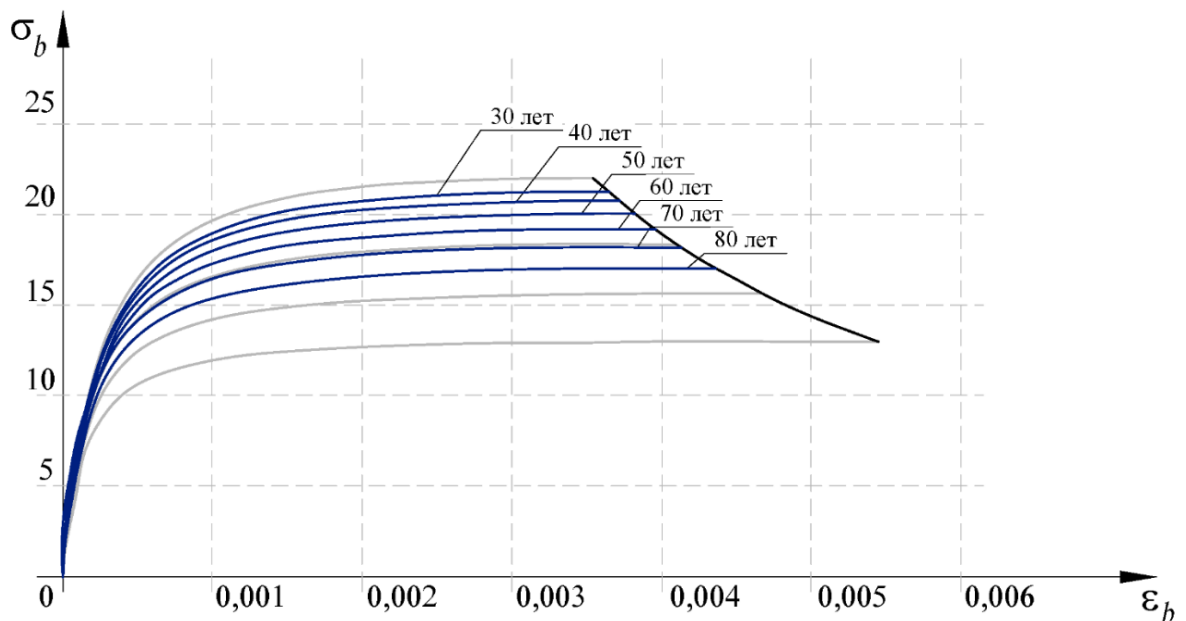


Рисунок 3.8 – Диаграммы деформирования бетона класса *B30* при неоднородном сжатии для относительной влажности воздуха в помещении 60 % в периоды эксплуатации железобетонных конструкций от 30 до 80 лет

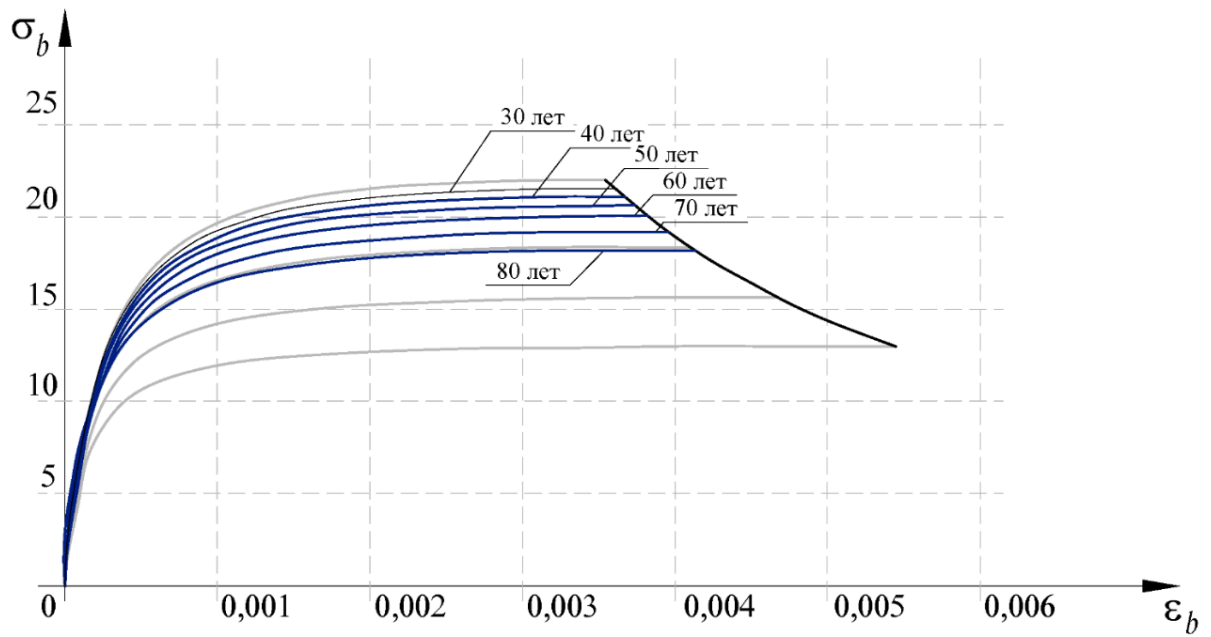


Рисунок 3.9 – Диаграммы деформирования бетона класса *B30* при неоднородном сжатии для относительной влажности воздуха в помещении 80 % в периоды эксплуатации железобетонных конструкций от 30 до 80 лет

На рисунках 3.10-3.12 показаны аналогичные диаграммы для бетона класса *B60*.

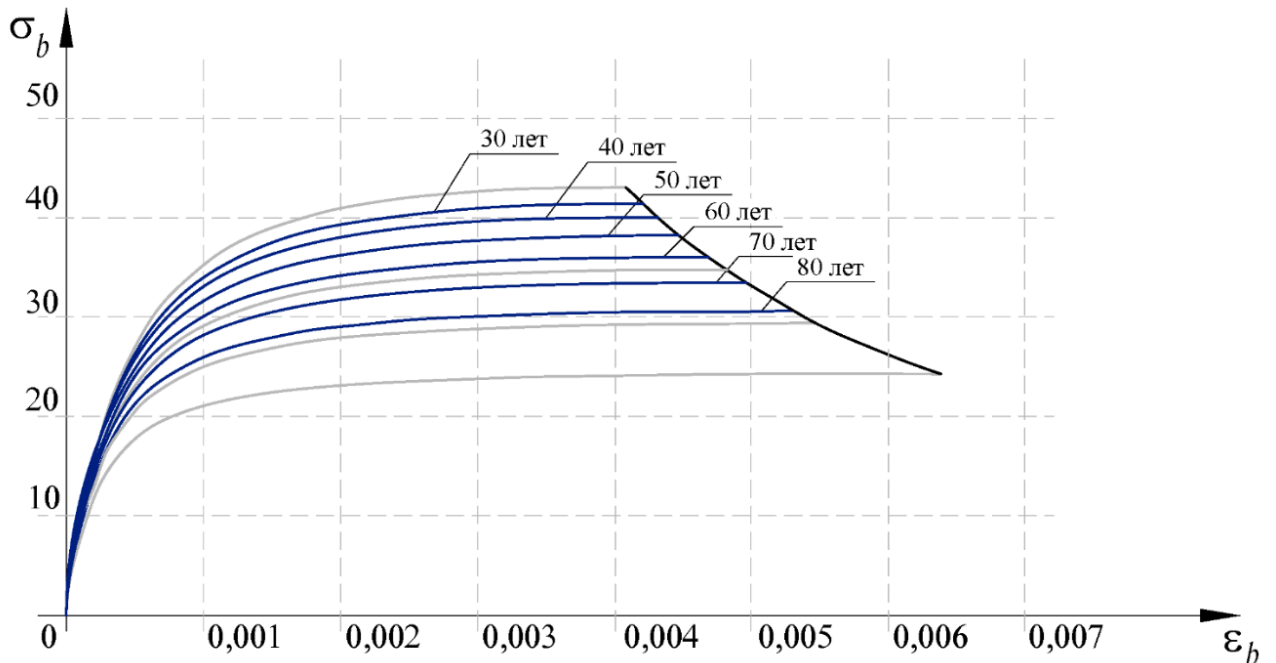


Рисунок 3.10 – Диаграммы деформирования бетона класса *B60* при неоднородном сжатии для относительной влажности воздуха в помещении 40 % в периоды эксплуатации железобетонных конструкций от 30 до 80 лет

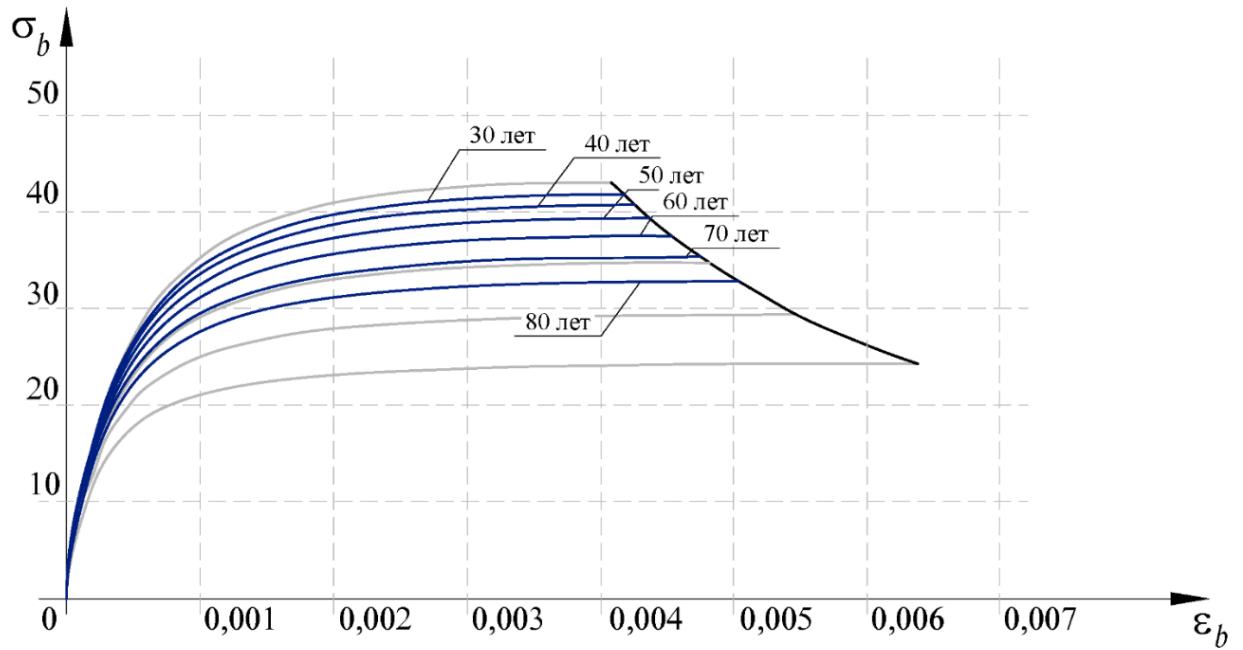


Рисунок 3.11 – Диаграммы деформирования бетона класса *B60* при неоднородном сжатии для относительной влажности воздуха в помещении 60 % в периоды эксплуатации железобетонных конструкций от 30 до 80 лет

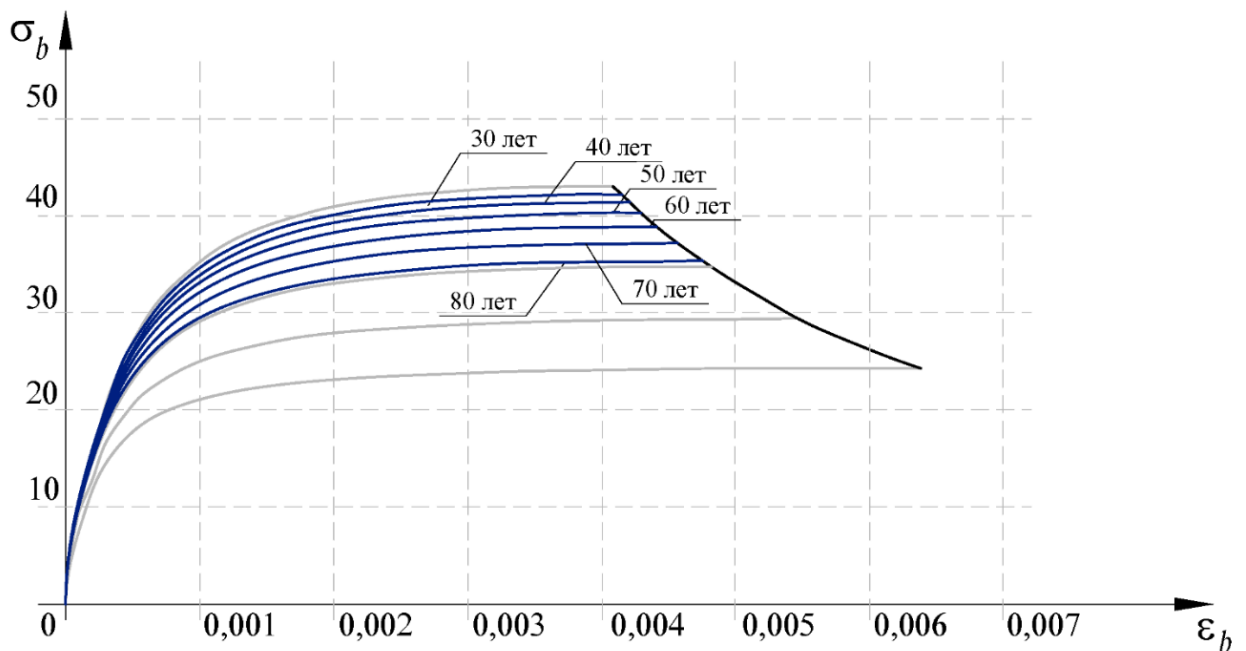


Рисунок 3.12 – Диаграммы деформирования бетона класса *B60* при неоднородном сжатии для относительной влажности воздуха в помещении 80 % в периоды эксплуатации железобетонных конструкций от 30 до 80 лет

Анализ полученных расчетных данных (см. таблицы 3.4, 3.5) и представленных на рисунках 3.7-3.12 диаграмм деформирования бетонов двух классов по прочности на сжатие (*B30*, *B60*) показывает, что величины предельных

сопротивлений и соответствующих относительных деформаций бетонов при неоднородном сжатии на начальном этапе эксплуатации железобетонных конструкций (30 лет) имеют несущественные отличия ($< 5 \%$) независимо от усредненной влажности воздуха в помещениях гражданских зданий.

С увеличением периода эксплуатации (50 лет) наблюдается тенденция к более значительным изменениям предельных параметров диаграмм от усредненной относительной влажности воздуха в помещениях. Так, при меньшей из рассмотренных величин относительной влажности воздуха (40 %) для бетонов обоих классов (*B30*, *B60*) предельное сопротивление при неоднородном сжатии снижается в среднем на 11,2 %. Соответственно, предельная относительная деформация бетона при этом увеличивается на 10,2 %. При усредненной относительной влажности воздуха 60 % аналогичные изменения предельных значений сопротивлений и относительных деформаций бетонов оказались менее значительны и, соответственно, составили: $- 8,7$ и $+ 7,6 \%$. При эксплуатации железобетонных конструкций из рассматриваемых классов бетонов (*B30*, *B60*) в помещениях с относительной влажностью воздуха 80 % изменение предельных параметров диаграмм стало еще меньше: соответственно, $- 6,1$ и $+ 5,5 \%$.

Для периода эксплуатации 80 лет наблюдаются наибольшие изменения предельных параметров диаграмм, в том числе в зависимости от усредненной относительной влажности воздуха в помещениях. Так, при величине относительной влажности воздуха (40 %) для бетонов обоих классов (*B30*, *B60*) предельное сопротивление при неоднородном сжатии снижается в среднем на 28,1 %, а относительная деформация при этом увеличивается на 29,8 %. При усредненной относительной влажности воздуха 60 % аналогичные изменения предельных значений сопротивлений и относительных деформаций бетонов оказались несколько меньше и, соответственно, составили: $- 22,0$ и $+ 23,3 \%$. При относительной влажности воздуха 80 % изменение предельных параметров диаграмм стало еще меньше: соответственно, $- 17,7$ и $+ 16,7 \%$.

Таким образом, полученные зависимости позволяют прогнозировать величины предельных сопротивлений и относительных деформаций бетонов при

неоднородном сжатии от длительного действия нагрузок при различных влажностных условиях эксплуатации.

3.3.2. Определение деформативно-прочностных характеристик бетона при неоднородном растяжении в заданный момент времени эксплуатации соответствующей железобетонной конструкции с учетом различных влажностных условий окружающей среды

Аналогичным образом можно получить зависимости для определения величин предельных сопротивлений и относительных деформаций бетонов при неоднородном растяжении с учетом различных влажностных условий для различных периодов их эксплуатации в составе изгибаемых железобетонных конструкций.

Изменение величины предельного сопротивления бетона при неоднородном растяжении R_{bt} в диапазоне от наибольшего значения (R_{btm}), полученного при кратковременном растяжении, до своего минимального предела при длительном растяжении R_{bt}^{L3} с учетом неблагоприятных влажностных условий эксплуатации, происходит по зависимости, показанной на рисунке 3.13, поз. 5.

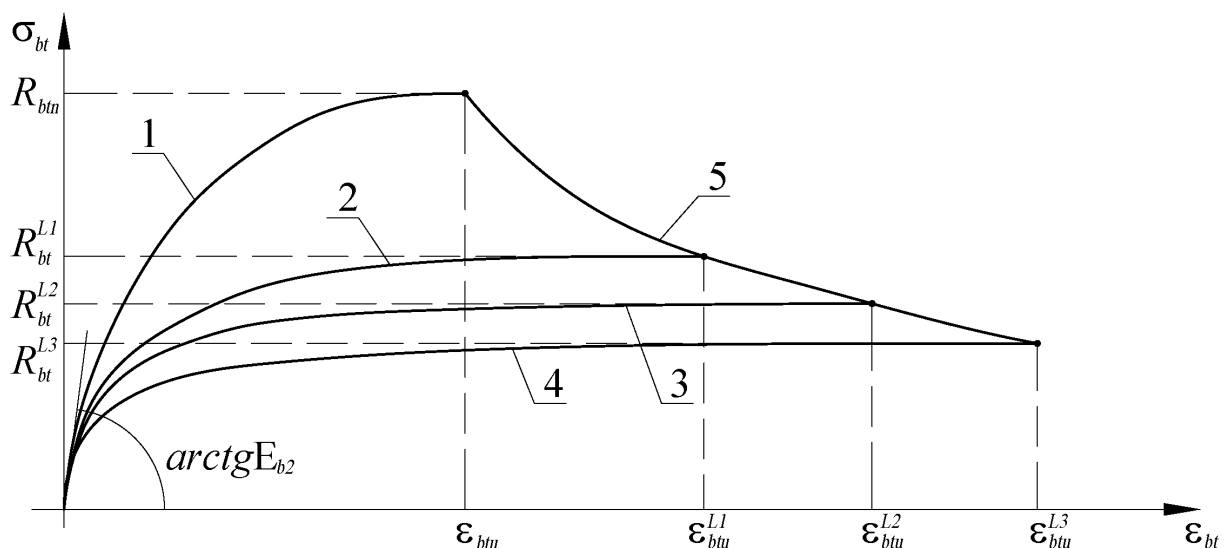


Рисунок 3.13 – Диаграммы деформирования бетона при неоднородном кратковременном (1) и длительном растяжении с учетом различных влажностных условий эксплуатации: 2 – благоприятные условия; 3 – нормальные условия; 4 – неблагоприятные условия; 5 – изменение предельного сопротивления бетона при неоднородном растяжении в зависимости от его предельной относительной деформации

Кривая проходит через промежуточные точки с координатами, соответствующими значениям предельных сопротивлений и относительных деформаций при длительном неоднородном растяжении при благоприятных влажностных условиях эксплуатации R_{bt}^{l1} и при длительном неоднородном растяжении при нормальных влажностных условиях эксплуатации R_{bt}^{l2} .

Аналитическое описание диаграммы можно представить следующим образом:

$$R_{bt,i}^j = \frac{L_{bt} + K_{bt} \varepsilon_{btu,i}}{1 + N_{bt} \varepsilon_{btu,i} + M_{bt} \varepsilon_{btu,i}^2}, \quad (3.37)$$

где $R_{bt,i}^j$ – предельное сопротивление бетона неоднородному растяжению на текущий момент времени, МПа ($j = L1, L2, L3$); $\varepsilon_{btu,i}$ – текущее значение относительной деформации.

Коэффициенты нелинейности K_{bt} , M_{bt} , L_{bt} , N_{bt} подбираются в зависимости от класса бетона для благоприятных, нормальных и неблагоприятных влажностных условий ($i = 1, 2, 3$). В таблице 3.8 представлены полученные значения коэффициентов для разных классов бетона.

Таблица 3.8 – Значения коэффициентов нелинейности K_{bt} , M_{bt} , L_{bt} , N_{bt} для классов бетона B10–B60

Параметр	Класс бетона					
	B10	B20	B30	B40	B50	B60
L_{bt}	-1,8995	-2,9401	-3,7125	-4,3475	-4,9214	-5,3826
K_{bt}	-2100,44	-2872,89	-3173,12	-3287,42	-3170,35	-3034,97
N_{bt}	-24026	-22389	-20841	-19569	-18082	-16998
M_{bt}	-24678640	-20222329	-16366314	-13514076	-10547430	-8609028

Зависимость, показывающая изменение предельного сопротивления бетона на растяжение в зависимости от продолжительности эксплуатации, имеет вид:

$$R_{bt,i}^j = \frac{L_i + K_i \cdot t}{1 + N_i \cdot t + M_i \cdot t^2}, \quad (3.38)$$

где t – продолжительность эксплуатации, годы.

Коэффициенты нелинейности K_i , M_i , L_i , N_i подбираются в зависимости от класса бетона для благоприятных, нормальных и неблагоприятных влажностных условий ($i = 1, 2, 3$). В таблице 3.9 представлены полученные значения коэффициентов для разных классов бетона.

Таблица 3.9 – Значения коэффициентов нелинейности K_{1-3} , M_{1-3} , L_{1-3} , N_{1-3} для определения величин предельных сопротивлений бетона при растяжении для классов бетона $B10$ – $B60$

Параметр	Класс бетона					
	$B10$	$B20$	$B30$	$B40$	$B50$	$B60$
L_1	0,85	1,35	1,75	2,1	2,45	2,75
K_1	-0,006295	-0,008889	-0,011219	-0,015120	-0,016381	-0,019359
N_1	-0,007481	-0,006307	-0,006163	-0,006714	-0,006548	-0,007746
M_1	2,913E-05	3,55E-05	3,86E-05	2,79E-05	3,82E-05	4,32E-05
L_2	0,85	1,35	1,75	2,1	2,45	2,75
K_2	-0,006141	-0,008750	-0,011363	-0,014823	-0,016884	-0,019066
N_2	-0,006947	-0,006136	-0,006231	-0,005796	-0,006540	-0,007579
M_2	3,765E-05	0,00004916	5,09E-05	3,30E-05	4,58E-05	5,60E-05
L_3	0,85	1,35	1,75	2,1	2,45	2,75
K_3	-0,006549	-0,009214	-0,011786	-0,014489	-0,017481	-0,019181
N_3	-0,005503	-0,005430	-0,005433	-0,004922	-0,005126	-0,00696
M_3	2,206E-05	0,00004828	5,22E-05	4,33E-05	3,93E-05	6,37E-05

На рисунке 3.14 показаны диаграммы изменения предельного сопротивления бетона неоднородному растяжению R_{bt} класса $B30$ от времени для трех вариантов влажностных условий эксплуатации до срока службы $t_{max} = 100$ лет.

С помощью горизонтальной прямой, проходящей через точку $0,6R_{bt}$, получаемой из отношения γ_{b1}/γ_b , можно определить максимальную продолжительность эксплуатации для трех вариантов относительной влажности в помещении (рисунок 3.15, поз. 4). На рисунке 3.15, поз. 5 показан график изменения предельного сопротивления растяжению бетона класса $B30$ от времени его эксплуатации по усредненному значению относительной влажности (60 %) в помещении. На рисунке 3.16 показано то же для бетона класса $B60$.

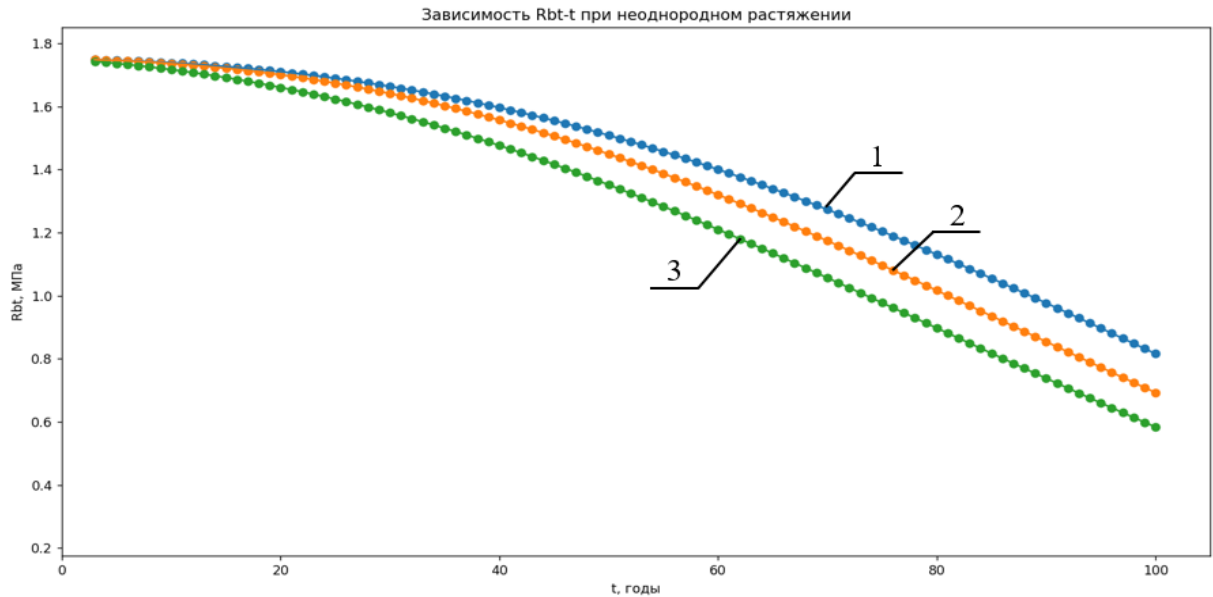


Рисунок 3.14 – Изменение предельного сопротивления при растяжении бетона класса В30 от времени его эксплуатации в благоприятных (1), нормальных (2) и неблагоприятных (3) условиях по относительной влажности в помещении до $t_{max} = 100$ лет

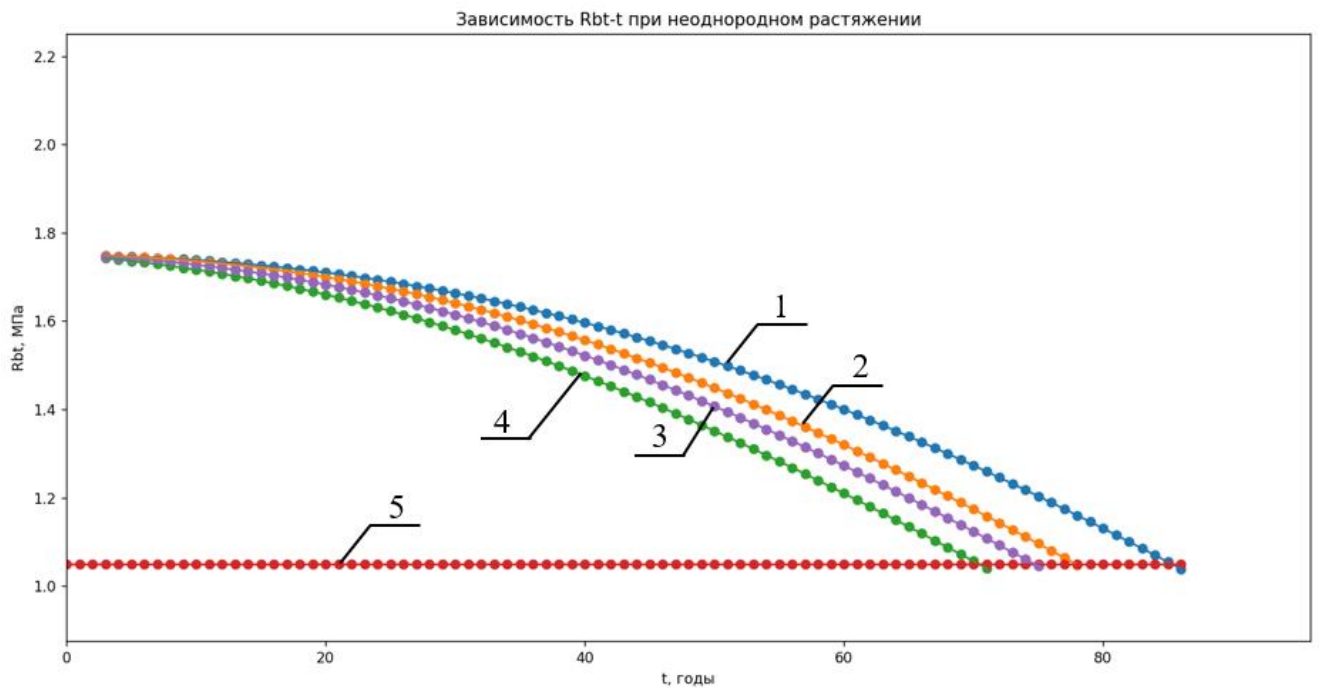


Рисунок 3.15 – Изменение предельного сопротивления растяжению бетона класса В30 от времени: 1 – при эксплуатации в благоприятных условиях; 2 – при эксплуатации в нормальных условиях; 3 – при эксплуатации в неблагоприятных условиях; 4 – при эксплуатации при промежуточном значении относительной влажности (60 %); 5 – горизонтальная прямая, соответствующая уровню $0,6R_{bm} = 1,05$ МПа

Промежуточное значение сопротивления при растяжении бетона R_{bt}^{φ} определяем аналогичным образом как и для предельного сопротивления при

сжатии R_b^{φ} с помощью интерполяции или экстраполяции по формулам (3.35–3.37), в которых вместо параметров с индексами «b» подставляем параметры с индексом «bt».

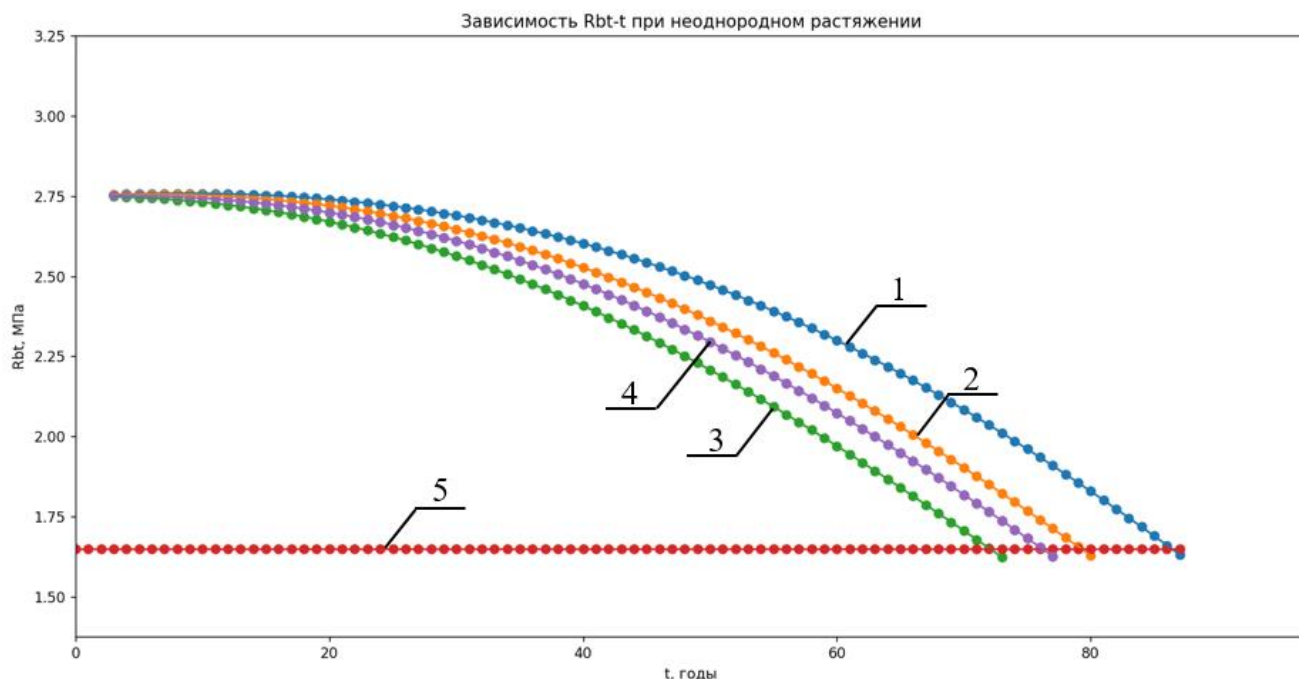


Рисунок 3.16 – Изменение предельного сопротивления растяжению бетона класса $B60$ от времени: 1 – при эксплуатации в благоприятных условиях; 2 – при эксплуатации в нормальных условиях; 3 – при эксплуатации в неблагоприятных условиях; 4 – при эксплуатации при промежуточном значении относительной влажности (60 %); 5 – горизонтальная прямая, соответствующая уровню $0,6R_{bm} = 1,65$ МПа

Сроки исчерпания прочности бетона класса $B30$ при растяжении составили: 86 лет для благоприятных условий эксплуатации, 78 лет – для нормальных условий и 71 год – для неблагоприятных условий эксплуатации. Сроки исчерпания прочности бетона класса $B60$ составили 87, 80 и 73 года соответственно.

С использованием зависимости (3.38) можно определить предельное сопротивление R_{bt}^{φ} в момент времени t_i , не превышающий t_{max} . По полученному R_{bt}^{φ} с помощью зависимости (3.37) можно определить соответствующую предельную величину относительной деформации бетона при длительном неоднородном растяжении.

В таблице 3.10 показаны прогнозируемые величины предельных сопротивлений бетона класса *B30* при растяжении и его относительных деформаций в зависимости от усредненной влажности воздуха в помещении и от времени эксплуатации. В таблице 3.11 – то же, для бетона класса *B60*.

Таблица 3.10 – Прогнозируемые величины предельных сопротивлений и относительных деформаций бетона класса *B30* при растяжении в зависимости от влажности воздуха в помещении и времени эксплуатации

Параметр	Относительная влажность, %	Период эксплуатации t_i , годы					
		20	30	40	50	60	70
R_{bti}^{φ}	40	1,660	1,580	1,476	1,351	1,210	1,057
$\varepsilon_{btui}^{\varphi}$		0,000152	0,000157	0,000164	0,000175	0,000191	0,000212
R_{bti}^{φ}	60	1,683	1,615	1,522	1,407	1,273	1,124
$\varepsilon_{btui}^{\varphi}$		0,000150	0,000154	0,000161	0,000170	0,000183	0,000202
R_{bti}^{φ}	80	1,702	1,645	1,564	1,461	1,336	1,194
$\varepsilon_{btui}^{\varphi}$		0,000149	0,000152	0,000158	0,000166	0,000177	0,000193

Таблица 3.11 – Прогнозируемые величины предельных сопротивлений и относительных деформаций бетона класса *B60* при растяжении в зависимости от влажности воздуха в помещении и времени эксплуатации

Параметры	Относительная влажность, %	Период эксплуатации t_i , годы					
		20	30	40	50	60	70
R_{bti}^{φ}	40	2,670	2,562	2,408	2,208	1,970	1,706
$\varepsilon_{btui}^{\varphi}$		0,000174	0,000179	0,000187	0,000198	0,000216	0,000240
R_{bti}^{φ}	60	2,699	2,610	2,476	2,295	2,073	1,818
$\varepsilon_{btui}^{\varphi}$		0,000172	0,000176	0,000183	0,000193	0,000208	0,000229
R_{bti}^{φ}	80	2,724	2,655	2,542	2,383	2,180	1,939
$\varepsilon_{btui}^{\varphi}$		0,000171	0,000174	0,000188	0,000188	0,000200	0,000218

Анализ полученных расчетных данных (см. таблицы 3.10, 3.11) для бетонов двух классов (*B30*, *B60*) показывает, что прогнозируемые величины их предельных сопротивлений при неоднородном растяжении имеют общую тенденцию, которая заключается в постепенном уменьшении их значений при возрастании периода эксплуатации железобетонных конструкций в помещениях гражданских зданий. В частности, для периода эксплуатации 20 лет снижение

величины R_{bt}^{φ} происходит незначительно (менее 5 %) для бетонов обоих классов. Для периода эксплуатации 40 лет величина предельного сопротивления бетона неоднородному растяжению снижается более существенно (от 10,6 до 15,7 %) и тем больше, чем меньше относительная влажность воздуха в помещениях. Влияние оказывает также нормативная прочность бетона при неоднородном растяжении. При этом, чем выше прочность бетона, тем меньше снижение его прочности при одной и той же величине относительной влажности воздуха в помещении. Так, для периода эксплуатации 40 лет и относительной влажности 40 % величина предельного сопротивления бетона неоднородному растяжению R_{bt}^{φ} для бетона класса *B60* снизилась на 12,4 %, а для класса *B30* – на 15,7 %. С увеличением периода эксплуатации до 80 лет снижение прочности бетона при растяжении происходит более интенсивно, но уровни этого понижения сближаются между собой. В частности, при относительной влажности воздуха в помещениях 40 % величина предельного сопротивления бетона неоднородному растяжению для более высокого класса (*B60*) снизилась на 38 %, а для класса *B30* – на 40 %, что можно считать достаточно близкими по величине параметрами.

Применительно к прогнозируемым величинам предельных относительных деформаций бетонов при неоднородном растяжении ($\varepsilon_{btui}^{\varphi}$) наблюдается аналогичная тенденция, только вместо снижения этого параметра наблюдается его рост при увеличении периода эксплуатации железобетонных конструкций, которые изготовлены из соответствующих бетонов. Этот рост тем больше, чем меньше относительная влажность воздуха в помещениях с железобетонными конструкциями. Также некоторое влияние оказывает прочность бетона, чем выше прочность бетона, тем меньше рост предельной относительной деформации, что следует оценивать в качестве положительного явления. Так, например, для относительной влажности воздуха 60 % для бетона класса *B30* рост величины параметра $\varepsilon_{btui}^{\varphi}$ для разных периодов эксплуатации железобетонных конструкций составляет: после 20 лет – 2,7 %; после 40 лет – 10,3 %; после 70 лет – 38,4 %. Для бетона класса *B60* при той же относительной влажности воздуха (60 %) и в те же

периоды эксплуатации рост указанного параметра, соответственно, составил: после 20 лет – 1,2 %; после 40 лет – 7,6 %; после 70 лет – 34,7 %.

Таким образом, были получены все необходимые зависимости, которые позволяют получить прогнозируемые параметры деформативно-прочностных характеристик бетонов при центральном и неоднородном сжатии, а также при растяжении с учетом различных влажностных условий при длительной эксплуатации железобетонных конструкций, которые изготовлены из этих бетонов.

3.3.3. Особенности определения параметров напряженно-деформированного состояния изгибаемых и внецентренно сжатых железобетонных конструкций в заданный момент времени их длительной эксплуатации с учетом влажностных условий окружающей среды

На основании полученных деформативно-прочностных характеристик бетона для изгибаемых и внецентренно сжатых конструкций можно рассчитать для них прогнозируемые значения прочности, трещиностойкости и деформативности с помощью нелинейной деформационной расчетной модели по методике, представленной в работах [134, 144-146], но скорректированной для определения длительной прочности конструкций с учетом относительной влажности в помещении.

Расчетная схема для определения прочности изгибаемых железобетонных элементов прямоугольного сечения с учетом длительной эксплуатации показана на рисунке 3.17.

Уравнения равновесия для определения прочности изгибаемого железобетонного элемента прямоугольного сечения, с учетом скорректированных, исходя из влажностных условий эксплуатации параметров, полученных ранее, имеют вид:

$$bx_c \omega_{cu} R_b^{\varphi} + \sigma_{sc} A_{sc} - bx_t \omega_{tu} R_{bt}^{\varphi} - \sigma_{st} A_{st} = 0, \quad (3.39)$$

$$M_u^{\varphi} = bx_c^2 \omega_{cu} \gamma_{cu} R_b^{\varphi} + \sigma_{sc} A_{sc} (x_c - a_c) + bx_t^2 \omega_{tu} \gamma_{tu} R_{bt}^{\varphi} + \sigma_{st} A_{st} (h - x_c - a_t), \quad (3.40)$$

где ω_{cu} , ω_{tu} , γ_{cu} , γ_{tu} – коэффициенты полноты эпюр напряжений и относительные расстояния от нейтральной оси сечения до центров тяжести соответствующих эпюр напряжений в сжатой и растянутой зонах бетона; R_b^φ , R_{bt}^φ – предельные сопротивления бетона при сжатии и растяжении для заданного усредненного значения относительной влажности; M_u^φ – искомый изгибающий момент, соответствующий исчерпанию прочности сечения для заданного усредненного значения относительной влажности; x_c , x_t – высота сжатой и растянутой зон бетона, соответственно; σ_{sc} , σ_{st} – напряжения в сжатой и растянутой арматуре; A_{sc} , A_{st} – площади сжатой и растянутой арматуры; a_c , a_t – расстояния от верхней и нижней граней сечения до центров тяжести сжатой и растянутой арматуры; h , b – геометрические размеры поперечного сечения (см. рисунок 3.17).

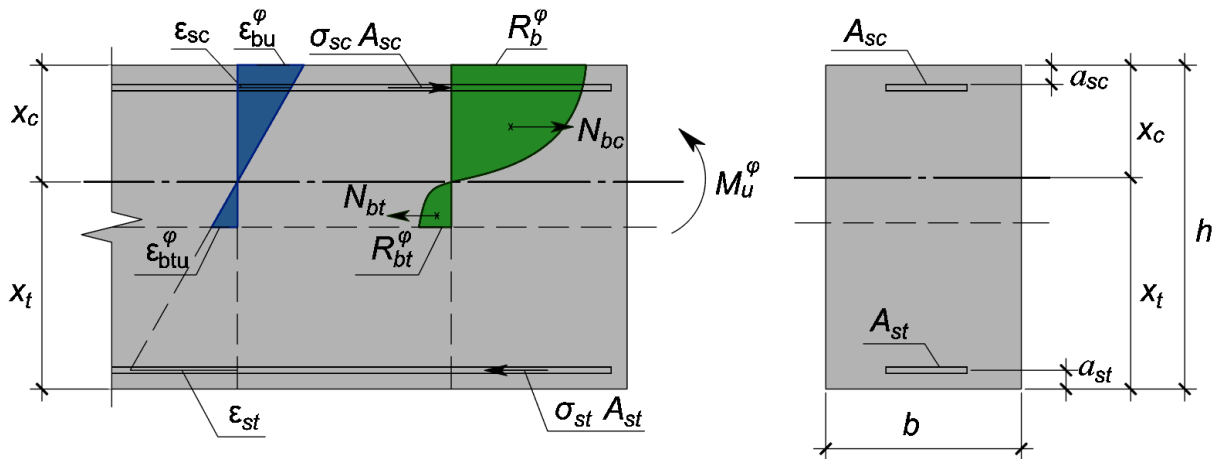


Рисунок 3.17 – Расчетная схема напряженно-деформированного состояния изгибаемого железобетонного элемента прямоугольного сечения непосредственно перед исчерпанием его прочности

Интегральные геометрические характеристики сжатой зоны бетона находятся с помощью зависимостей:

$$\omega_{cu} = \frac{E_{b2}}{R_b^\varphi C_{b2}^\varphi} \left\{ \frac{D_{b2}^\varphi \varepsilon_{bu}^\varphi}{2} + \left[1 - \frac{D_{b2}^\varphi}{C_{b2}^\varphi} \right] \left(1 - \frac{\ln(1 + C_{b2}^\varphi \varepsilon_{bu}^\varphi)}{C_{b2}^\varphi \varepsilon_{bu}^\varphi} \right) \right\}, \quad (3.41)$$

$$\gamma_{cu} = \frac{\frac{D_{b2}^\varphi \varepsilon_{bu}^\varphi}{3} + \left[1 - \frac{D_{b2}^\varphi}{C_{b2}^\varphi} \right] \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{C_{b2}^\varphi \varepsilon_{bu}^\varphi} \left(1 - \frac{\ln(1 + C_{b2}^\varphi \varepsilon_{bu}^\varphi)}{C_{b2}^\varphi \varepsilon_{bu}^\varphi} \right) \right)}{\frac{D_{b2}^\varphi \varepsilon_{bu}^\varphi}{2} + \left[1 - \frac{D_{b2}^\varphi}{C_{b2}^\varphi} \right] \left(1 - \frac{\ln(1 + C_{b2}^\varphi \varepsilon_{bu}^\varphi)}{C_{b2}^\varphi \varepsilon_{bu}^\varphi} \right)}. \quad (3.42)$$

Интегральные геометрические характеристики растянутой зоны бетона находятся с помощью аналогичных зависимостей:

$$\omega_{tu} = \frac{E_{b2}}{R_{bt}^\varphi C_{bt2}^\varphi} \left\{ \frac{D_{bt2}^\varphi \varepsilon_{btu}^\varphi}{2} + \left[1 - \frac{D_{bt2}^\varphi}{C_{bt2}^\varphi} \right] \left(1 - \frac{\ln(1 + C_{bt2}^\varphi \varepsilon_{btu}^\varphi)}{C_{bt2}^\varphi \varepsilon_{btu}^\varphi} \right) \right\}, \quad (3.43)$$

$$\gamma_{tu} = \frac{\frac{D_{bt2}^\varphi \varepsilon_{btu}^\varphi}{3} + \left[1 - \frac{D_{bt2}^\varphi}{C_{bt2}^\varphi} \right] \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{C_{bt2}^\varphi \varepsilon_{btu}^\varphi} \left(1 - \frac{\ln(1 + C_{bt2}^\varphi \varepsilon_{btu}^\varphi)}{C_{bt2}^\varphi \varepsilon_{btu}^\varphi} \right) \right)}{\frac{D_{bt2}^\varphi \varepsilon_{btu}^\varphi}{2} + \left[1 - \frac{D_{bt2}^\varphi}{C_{bt2}^\varphi} \right] \left(1 - \frac{\ln(1 + C_{bt2}^\varphi \varepsilon_{btu}^\varphi)}{C_{bt2}^\varphi \varepsilon_{btu}^\varphi} \right)}. \quad (3.44)$$

Для рассматриваемого железобетонного элемента записываем следующие условия совместности деформаций с учетом принятой гипотезы плоских сечений:

$$\frac{\varepsilon_{btu}^\varphi}{x_t} = \frac{\varepsilon_{bu}^\varphi}{x_c}, \quad (3.45)$$

$$\frac{\varepsilon_{sc}}{\varepsilon_{bu}^\varphi} = 1 - \frac{a_c}{x_c}, \quad (3.46)$$

$$\frac{\varepsilon_{st}}{\varepsilon_{bu}^\varphi} = \frac{h - a_t}{x_c} - 1, \quad (3.47)$$

где ε_{sc} , ε_{st} – относительные деформации, соответственно, в сжатой и растянутой арматуре.

Напряжения в сжатой и растянутой арматуре σ_{sc} , σ_{st} находим с использованием универсальной кусочной функции (3.48–3.50) [146]:

$$\text{при } 0 < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{el} \quad \sigma_s = E_s \varepsilon_s, \quad (3.48)$$

$$\text{при } \varepsilon_{el} < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{yf} \quad \sigma_s = \sigma_{el} + \frac{E_s (\varepsilon_s - \varepsilon_{el}) [1 + D_{s1} (\varepsilon_s - \varepsilon_{el})]}{1 + C_{s1} (\varepsilon_s - \varepsilon_{el})}, \quad (3.49)$$

$$\text{при } \varepsilon_{yf} < \varepsilon_s \leq \varepsilon_u \quad \sigma_s = \sigma_y + \frac{E_{s2} (\varepsilon_s - \varepsilon_{yf}) [1 + D_{s2} (\varepsilon_s - \varepsilon_{yf})]}{1 + C_{s2} (\varepsilon_s - \varepsilon_{yf})}, \quad (3.50)$$

где E_s – начальный модуль упругости арматуры; σ_{el} , ε_{el} – предел упругости и соответствующая относительная деформация арматуры; σ_y , ε_{yf} – предел текучести арматуры и относительная деформация в конце площадки текучести; ε_u – предельная относительная деформация при разрыве арматуры; C_{s1} , D_{s1} , C_{s2} , D_{s2} – параметры нелинейности кусочной функции, описывающей, соответственно, второй и третий участки диаграммы; E_{s2} – модуль упругости арматуры в начальной точке третьего участка.

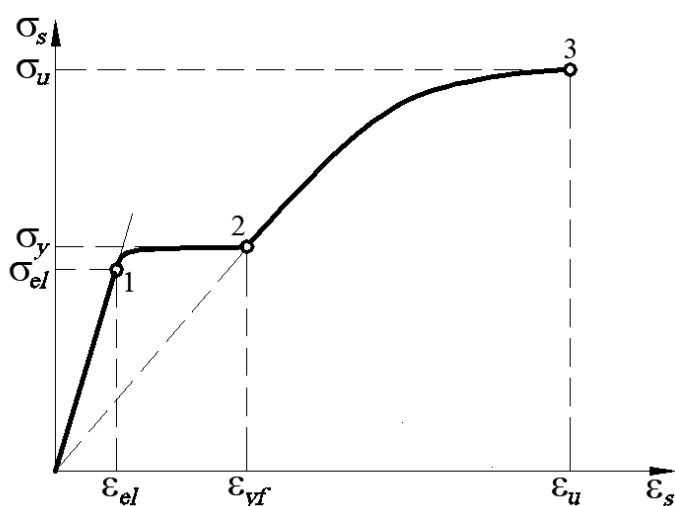


Рисунок 3.18 – Диаграммы растяжения арматурной стали с физической площадкой текучести [146]

Графически зависимость показана на рисунке 3.18.

При построении методики расчета трещиностойкости изгибаемых железобетонных элементов прямоугольного поперечного сечения используем основные компоненты нелинейной деформационной расчетной модели, а именно: уравнения равновесия, условия линейного распределения

относительных деформаций по сечению, а также уточненные нелинейные диаграммы деформирования бетона и арматуры. При этом диаграммы деформирования бетона при неоднородном сжатии и растяжении принимаются с учетом влажностных условий длительной эксплуатации железобетонных конструкций в помещениях гражданских зданий.

Расчетная схема рассматриваемой железобетонной балки для начальной стадии процесса трещинообразования, а именно, в момент перед образованием первой трещины, представлена на рисунке 3.19.

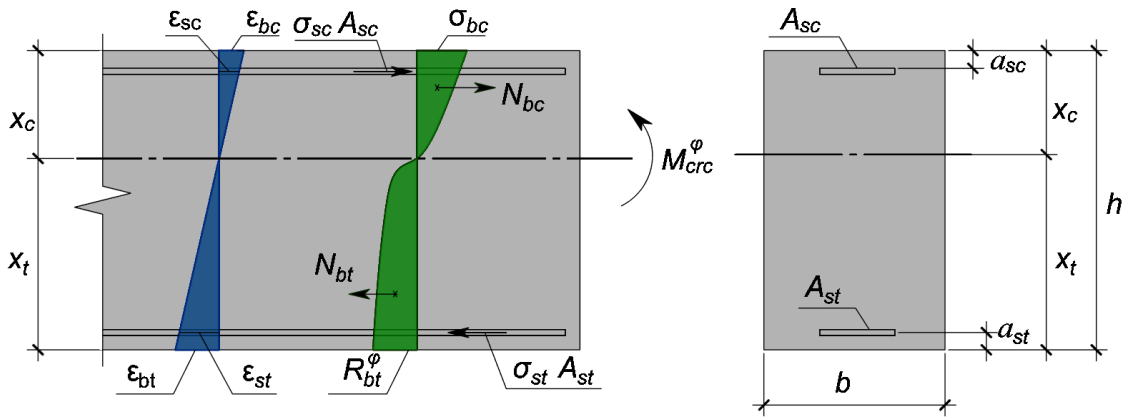


Рисунок 3.19 – Расчетная схема напряженно-деформированного состояния изгибаемого железобетонного элемента прямоугольного сечения непосредственно перед появлением первой трещины в растянутой зоне бетона

Следующие две формулы отображают уравнения равновесия для изгибаемого железобетонного элемента прямоугольного поперечного сечения применительно к начальной стадии трещинообразования:

$$bx_c \omega_c \sigma_{bc} + \sigma_{sc} A_{sc} - bx_t \omega_{tu} R_{bt}^\varphi - \sigma_{st} A_{st} = 0, \quad (3.51)$$

$$M_{crc}^\varphi = bx_c^2 \omega_c \gamma_c \sigma_{bc} + \sigma_{sc} A_{sc} (x_c - a_{sc}) + bx_t^2 \omega_{tu} \gamma_{tu} R_{bt}^\varphi + \sigma_{st} A_{st} (h - x_c - a_{st}), \quad (3.52)$$

где M_{crc}^φ – момент появления первой трещины в сечении; ω_c, γ_c – интегральные геометрические параметры эпюры напряжений в сжатой зоне бетона; σ_{bc} – величина краевого напряжения бетона на верхней сжатой грани сечения балки.

Для вычисления интегральных геометрических характеристик сжатой и растянутой зон бетона используем выражения (3.41–3.44) [147, 148].

Следующие условия совместности относительных деформаций записываем для рассматриваемого железобетонного элемента с учетом принятой гипотезы плоских сечений:

$$\frac{\epsilon_{btu}^\varphi}{x_t} = \frac{\epsilon_{bc}}{x_c}, \quad (3.53)$$

$$x_t = h - x_c, \quad (3.54)$$

$$\frac{\epsilon_{sc}}{\epsilon_{bc}} = 1 - \frac{a_{sc}}{x_c}, \quad (3.55)$$

$$\frac{\varepsilon_{st}}{\varepsilon_{bc}} = \frac{h - a_t}{x_c} - 1. \quad (3.56)$$

Напряжения в сжатой и растянутой арматуре σ_{sc} , σ_{st} находим с использованием универсальной кусочной функции (3.48–3.50).

Величину краевого напряжения σ_{bc} на верхней сжатой грани сечения балки определяем по следующей формуле:

$$\sigma_{bc} = \frac{E_{b2} \varepsilon_{bc} (1 + D_{b2}^{\varphi} \varepsilon_{bc})}{1 + C_{b2}^{\varphi} \varepsilon_{bc}}. \quad (3.57)$$

Последняя зависимость завершает формирование системы разрешающих уравнений для определения параметров напряженно-деформированного состояния изгибаемых железобетонных элементов прямоугольного поперечного сечения на стадии, непосредственно предшествующей образованию первой трещины в растянутой зоне. В результате ее численного решения с использованием одного из итерационных алгоритмов определяется искомый изгибающий момент M_{crc}^{φ} .

Прогиб от действия поперечной равномерно распределенной или сосредоточенной нагрузки в изгибаемых железобетонных элементах определяют по известной [149] формуле:

$$f_m = \int_0^L \overline{M}_x (1/r)_x dx, \quad (3.58)$$

где \overline{M}_x – изгибающий момент в сечении x от действия единичной силы, приложенной по направлению искомого перемещения элемента в сечении по длине пролета L ; $(1/r)_x$ – кривизна балки в сечении x от нагрузки, при которой определяется прогиб.

Вычисление прогиба производят путем разбиения изгибаемого железобетонного элемента на несколько (n) одинаковых по длине участков ΔL , определения кривизны на этих участках (с учетом отсутствия или наличия трещин и знака кривизны) и перемножения эпюр моментов \overline{M}_i и кривизны $(1/r)_i$ по длине

элемента при линейном распределении кривизны в пределах каждого участка [149]. Суммируя получаемые результаты по всем n участкам, находим искомый прогиб. Таким образом, интегральная зависимость (3.58) для практических расчетов преобразуется в сумму соответствующего ряда значений по числу заданных n участков разбиения балки:

$$f_m = \sum_{i=1}^n (\overline{M}_i (1/r_i)). \quad (3.59)$$

Для определения кривизны на каждом из отдельных участков (ΔL) рассматриваемого элемента прямоугольного поперечного сечения без образования трещин в его растянутой зоне используем те же подходы, что и ранее.

Кривизну сечения ($1/r_i$) изгибаемого железобетонного элемента в случае отсутствия трещин в его растянутой зоне на i -том участке находят с помощью следующей зависимости:

$$\frac{1}{r_i} = \frac{\varepsilon_{bc} + \varepsilon_{bt}}{h}, \quad (3.60)$$

где ε_{bc} и ε_{bt} – относительные деформации бетона на верхней и нижней гранях в расчетном сечении i -го участка изгибаемого элемента при заданной нагрузке; h – высота сечения элемента.

Для определения неизвестных величин относительных деформаций ε_{bc} , ε_{bt} рассмотрим изгибаемый железобетонный элемент прямоугольного сечения на этапе его работы без образования трещин в растянутой зоне (рисунок 3.20). При этом действующий внешний изгибающий момент M_i считается заданным.

Уравнения равновесия для этого случая напряженно-деформированного состояния имеют вид:

$$bx_c \omega_c \sigma_{bc} + \sigma_{sc} A_{sc} - bx_t \omega_t \sigma_{bt} - \sigma_{st} A_{st} = 0, \quad (3.61)$$

$$M_i = bx_c^2 \omega_c \gamma_c \sigma_{bc} + \sigma_{sc} A_{sc} (x_c - a_c) + bx_t^2 \omega_t \gamma_t \sigma_{bt} + \sigma_{st} A_{st} (h - x_c - a_t), \quad (3.62)$$

где M_i – действующий внешний изгибающий момент, для которого рассчитывается кривизна в i -м сечении элемента; ω_c , γ_c , ω_t , γ_t – интегральные

геометрические характеристики эпюр напряжений в сжатой и растянутой зонах бетона.

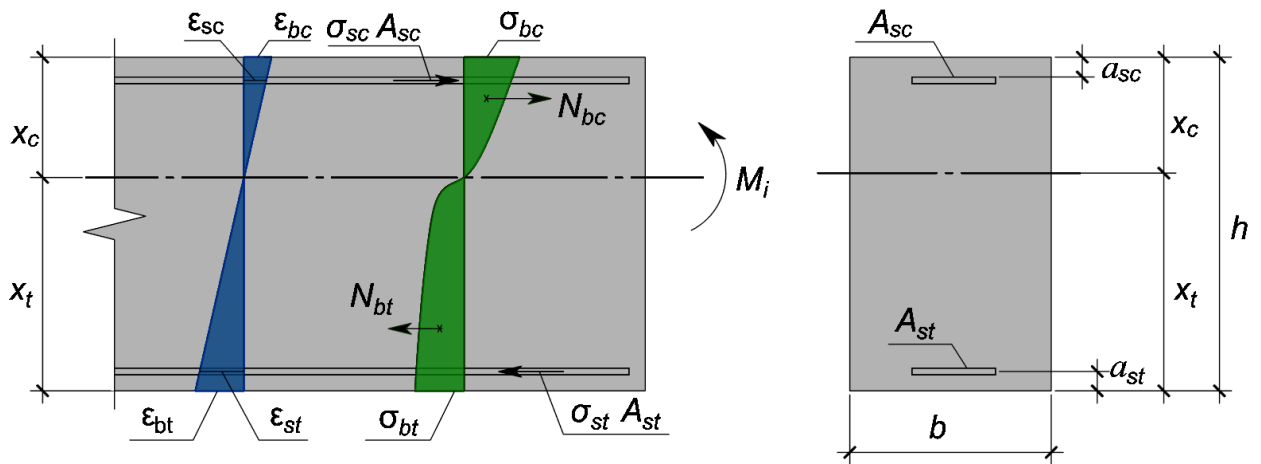


Рисунок 3.20 – Схема распределения относительных деформаций, напряжений и усилий в сечении изгибаемого железобетонного элемента прямоугольной формы на этапе его работы без трещин

Для сжатой и растянутой зон бетона интегральные геометрические характеристики ω_c , γ_c , ω_t , γ_t определяются с помощью полученных выше выражений (3.41–3.44).

Для рассматриваемого железобетонного элемента условия линейного распределения относительных деформаций совпадают с ранее полученными зависимостями (3.53–3.56).

Наибольшее напряжение в крайнем волокне сжатой зоны бетона σ_{bc} находим с использованием зависимости (3.57), а неизвестное напряжение в растянутом бетоне σ_{bt} рассчитываем по формуле:

$$\sigma_{bt} = \frac{E_{b2} \varepsilon_{bt} (1 + D_{bt2}^{\varphi} \varepsilon_{bt})}{1 + C_{bt2}^{\varphi} \varepsilon_{bt}}. \quad (3.63)$$

В результате решения полученной системы уравнений определяем параметры НДС изгибаемого железобетонного элемента в сечении без трещин, в том числе искомые величины относительных деформаций ε_{bc} , ε_{bt} , которые используются для вычисления кривизны по формуле (3.60).

Рассчитав, таким образом, кривизны на всех участках изгибаемого железобетонного элемента, по формуле (3.59) определяют искомый прогиб от действующей равномерно распределенной нагрузки, не вызывающей образования трещин в растянутой зоне бетона.

Для определения кривизны на отдельных участках изгибаемого железобетонного элемента рассматриваемого вида с трещинами в растянутой зоне используется гипотеза плоских сечений в варианте В.И. Мурашева – Я.М. Немировского [150, 151] для некоторого расчетного сечения, в котором деформации бетона и арматуры соответствуют усредненному состоянию блока между нормальными трещинами. Тогда вычисление кривизны для участка с нормальными трещинами производится по известной зависимости [96]:

$$\frac{1}{r_i} = \frac{\psi_b \varepsilon_{bc} + \psi_s \varepsilon_{st}}{h_0}, \quad (3.64)$$

где ψ_b – коэффициент, учитывающий неравномерность распределения относительных деформаций сжатого бетона между трещинами и принимаемый равным 0,9 [96]; ε_{bc} – текущая величина относительной деформации сжатого бетона на верхней грани трапециевидного сечения элемента на этапе его трещинообразования в растянутой зоне; ψ_s – коэффициент, учитывающий неравномерность распределения относительных деформаций растянутой арматуры в сечении с трещиной и на участке между трещинами; ε_{st} – текущая величина относительной деформации арматуры в том же сечении изгибаемого железобетонного элемента с учетом процесса трещинообразования в его растянутой зоне; h_0 – рабочая высота сечения изгибаемого железобетонного элемента.

Значение коэффициента ψ_s вычисляется по формуле, рекомендуемой в работе [152]:

$$\psi_s = 1 - \frac{\varepsilon_{st,cr}}{\varepsilon_{st}} \beta, \quad (3.65)$$

где $\varepsilon_{st,crc}$ – относительная деформация арматуры в растянутой зоне сечения изгибаемого железобетонного элемента сразу после образования в нем трещины; ε_{st} – текущая величина относительной деформации арматуры в том же сечении изгибаемого железобетонного элемента с учетом процесса трещинообразования в растянутой зоне бетона; β – коэффициент, обеспечивающий неразрывность графика «момент – кривизна» в точке, соответствующей моменту трещинообразования сечения элемента (по рекомендациям [96] $\beta = 0,8$).

Практическое применение формулы (3.65) с постоянным значением коэффициента β для нахождения кривизн на участках железобетонных элементов с трещинами в растянутой зоне во многих случаях не обеспечивает неразрывности функции «момент – кривизна». В работе [152] предложена методика для вычисления фактических значений коэффициента β применительно к балочным элементам прямоугольного поперечного сечения. Исходя из назначения этого параметра в формуле (3.65), для его нахождения предлагается следующее выражение:

$$\beta = 1 - \frac{h_0/r_{crc} - \psi_b \varepsilon_{bc,crc}}{\varepsilon_{st,crc}} \geq 0, \quad (3.66)$$

где r_{crc} – радиус кривизны элемента в рассматриваемом сечении непосредственно перед образованием в нем трещины; $\varepsilon_{bc,crc}$, $\varepsilon_{st,crc}$ – относительные деформации сжатого бетона на верхней грани поперечного сечения и растянутой арматуры сразу после образования первой трещины на нижней грани.

Чтобы найти количественные значения коэффициента β для изгибаемого элемента, необходимо предварительно определить его НДС непосредственно перед образованием в нем первой трещины и сразу после ее появления.

В дополнение к искомой величине момента трещинообразования (M_{crc}^{φ}), методика расчета которого была изложена ранее, необходимо также найти кривизну сечения ($1/r_{crc}$) непосредственно перед образованием в нем первой трещины с помощью зависимости:

$$\frac{1}{r_{crc}} = \frac{\varepsilon_{bc} + \varepsilon_{btu}^{\varphi}}{h}, \quad (3.67)$$

где ε_{bc} и $\varepsilon_{btu}^{\varphi}$ – относительные деформации бетона на верхней и нижней гранях в сечении изгибаемого железобетонного элемента при действии изгибающего момента M_{crc}^{φ} .

Для решения второй задачи рассмотрим тот же железобетонный элемент сразу после образования в нем первой трещины (рисунок 3.21). При этом действующий внешний изгибающий момент принимается равным M_{crc}^{φ} .

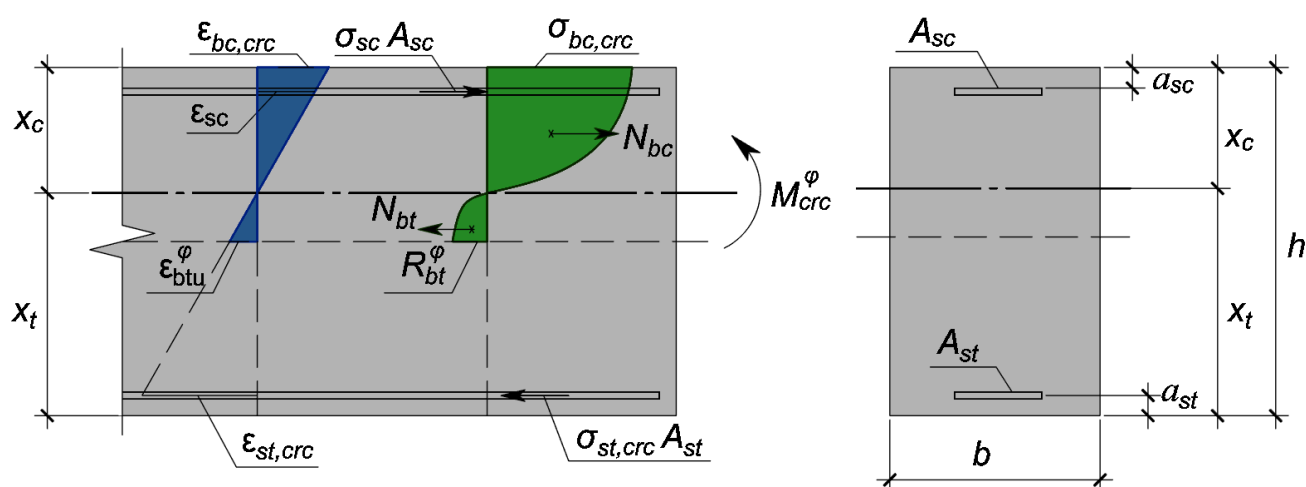


Рисунок 3.21 – Схема распределения относительных деформаций, напряжений и усилий в сечении изгибаемого железобетонного элемента прямоугольной формы сразу после образования в нем первой трещины

Уравнения равновесия для изгибаемого железобетонного элемента прямоугольного сечения на этапе сразу после образования в нем первой трещины имеют вид:

$$bx_c \omega_c \sigma_{bc,crc} + \sigma_{sc} A_{sc} - bx_t \omega_{tu} R_{bt}^{\varphi} - \sigma_{st,crc} A_{st} = 0, \quad (3.68)$$

$$M_{crc}^{\varphi} = bx_c^2 \omega_c \gamma_c \sigma_{bc,crc} + \sigma_{sc} A_{sc} (x_c - a_c) + bx_t^2 \omega_{tu} \gamma_{tu} R_{bt}^{\varphi} + \sigma_{st,crc} A_{st} (h - x_c - a_t), \quad (3.69)$$

где M_{crc}^{φ} – изгибающий момент, соответствующий появлению первой трещины в растянутой зоне бетона изгибаемого железобетонного элемента; $\sigma_{bc,crc}$ – величина напряжения в сжатом бетоне на верхней грани поперечного сечения элемента на этапе появления первой трещины в его растянутой зоне;

$\sigma_{st,crc}$ – напряжение в растянутой арматуре сразу после образования первой трещины на нижней грани железобетонного элемента.

Интегральные геометрические характеристики сжатой зоны бетона находятся с помощью зависимостей (3.41), (3.42). Аналогичные интегральные характеристики $(\omega_{tu}, \gamma_{tu})$ для растянутой зоны бетона определяют по ранее представленным выражениям (3.43), (3.44).

Для рассматриваемого железобетонного элемента являются справедливыми следующие условия совместности деформаций:

$$\frac{\varepsilon_{btu}^p}{x_t} = \frac{\varepsilon_{bc,crc}}{x_c}, \quad (3.70)$$

$$\frac{\varepsilon_{st,crc}}{\varepsilon_{bc,crc}} = \frac{h - a_t}{x_c} - 1, \quad (3.71)$$

$$\frac{\varepsilon_{sc}}{\varepsilon_{bc,crc}} = 1 - \frac{a_c}{x_c}, \quad (3.72)$$

где $\varepsilon_{bc,crc}$ – величина относительной деформации сжатого бетона на верхней грани поперечного сечения элемента на этапе появления первой трещины в его растянутой зоне; $\varepsilon_{st,crc}$ – относительная деформация растянутой арматуры сразу после образования первой трещины на нижней грани железобетонного элемента.

Как и в других рассмотренных выше случаях, напряжения в сжатой и растянутой арматуре σ_{sc} , $\sigma_{st,crc}$ находим с использованием универсальной кусочной функции (3.48–3.50).

Для удобства обозримости системы разрешающих уравнений расчет напряжения в растянутой арматуре обозначим следующим функциональным выражением:

$$\sigma_{st,crc} = f(\varepsilon_{st,crc}). \quad (3.73)$$

Наибольшее напряжение на сжатой грани изгибаемого железобетонного элемента на этапе появления первой трещины в его растянутой зоне находим с

использованием зависимости для описания диаграммы неоднородного сжатия бетона:

$$\sigma_{bc,crc} = \frac{E_{b2} \varepsilon_{bc,crc} (1 + D_{b2}^{\varphi} \varepsilon_{bc,crc})}{1 + C_{b2}^{\varphi} \varepsilon_{bc,crc}}. \quad (3.74)$$

В результате решения полученной системы уравнений находятся все необходимые параметры напряженно-деформированного состояния для изгибаемого железобетонного элемента сразу после образования в нем первой трещины, в том числе искомые величины относительных деформаций и напряжений в сжатом бетоне и в растянутой арматуре $\varepsilon_{bc,crc}$, $\varepsilon_{st,crc}$, $\sigma_{bc,crc}$, $\sigma_{st,crc}$.

Теперь с помощью зависимости (3.66) может быть вычислено фактическое значение коэффициента β , обеспечивающего неразрывность функции «момент – кривизна» в точке, соответствующей моменту трещинообразования сечения элемента. Далее этот параметр (β) применяется для расчета коэффициентов ψ_s , входящих составной частью в формулу (3.65), используемую для вычисления кривизн применительно к тем участкам в изгибаемых железобетонных элементах, в которых возникли нормальные трещины.

В частности, рассмотрим напряженно-деформированное состояние изгибаемого железобетонного элемента прямоугольного поперечного сечения на участке с нормальными трещинами. Расчетная схема такой конструкции представлена на рисунке 3.22.

Уравнения равновесия для этого случая напряженно-деформированного состояния железобетонной балки имеют вид:

$$bx_c \omega_c \sigma_{bc} + \sigma_{sc} A_{sc} - bx_t \omega_{tu} R_{bt}^{\varphi} - \sigma_{st} A_{st} = 0, \quad (3.75)$$

$$M_i = bx_c^2 \omega_c \gamma_c \sigma_{bc} + \sigma_{sc} A_{sc} (x_c - a_c) + bx_t^2 \omega_{tu} \gamma_{tu} R_{bt}^{\varphi} + \sigma_{st} A_{st} (h - x_c - a_t), \quad (3.76)$$

где M_i – действующий в рассматриваемом сечении известный по величине изгибающий момент.

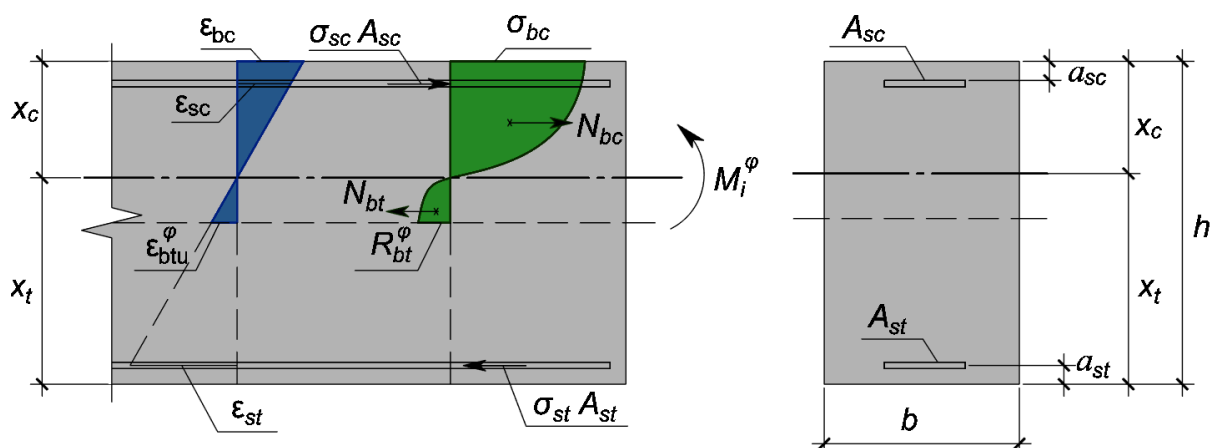


Рисунок 3.22 – Схема распределения деформаций, напряжений и усилий в сечении железобетонной балки прямоугольной формы с трещинами в растянутой зоне от действия заданного по величине изгибающего момента

Для определения коэффициентов полноты эпюр напряжений (ω_c , ω_{tu}) и относительных расстояний от нейтральной оси сечения до центров тяжести соответствующих эпюр напряжений (γ_c , γ_{tu}) используются ранее представленные зависимости (3.41–3.44).

Для рассматриваемого железобетонного элемента справедливы условия плоских деформаций, которые практически совпадают с ранее полученными соотношениями (3.70–3.72).

Наибольшее напряжение σ_{bc} на верхней грани изгибаемого железобетонного элемента находим с использованием зависимости (3.57). Напряжения в сжатой и растянутой арматуре σ_{sc} , σ_{st} находим с использованием универсальной кусочной функции (3.48–3.50).

В результате решения полученной системы уравнений находятся все необходимые параметры напряженно-деформированного состояния для изгибаемого железобетонного элемента прямоугольного поперечного сечения с трещинами в растянутой зоне, в том числе искомые величины относительных деформаций ϵ_{bc} , ϵ_{st} . При этом расчетные значения кривизн ($1/r_i$) на участках с трещинами должны определяться по зависимостям (3.64–3.66), а на участках без трещин с помощью выражения (3.60). Рассчитав, таким образом, кривизны на всех участках железобетонной конструкции, по формуле (3.59) определяют искомый прогиб от действующей нагрузки, которая на отдельных наиболее нагруженных

участках вызывает процесс трещинообразования, а на других образование трещин в растянутой зоне бетона не происходит.

Что касается внецентренно сжатых элементов, методика расчета прочности, трещиностойкости и деформативности с учетом длительной эксплуатации в различных влажностных условиях также может быть применена и к ним.

Особенностью расчета прочности колонн является его зависимость от граничного эксцентриситета, позволяющего безошибочно выбрать одну из двух расчетных методик для случаев воздействия на колонну продольного усилия с большим или малым эксцентриситетом [143, 145, 153]. Центральное сжатие рассматривается при этом как частный случай малых эксцентриситетов. При перемещении действующей силы от центра тяжести поперечного сечения элемента на небольшое расстояние e_0 его напряженное состояние существенно изменяется (рисунок 3.23).

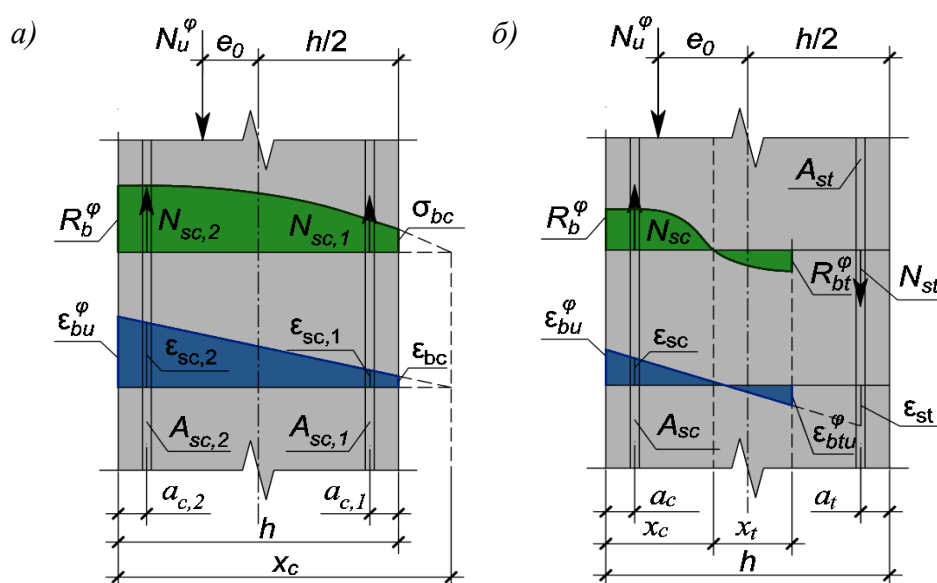


Рисунок 3.23 – Схема распределения деформаций, напряжений и усилий в сечении внецентренно сжатого железобетонного элемента на стадии исчерпания его прочности:

a – в случае малых эксцентриситетов приложения продольной силы;

б – в случае больших эксцентриситетов

Эпюра сжимающих напряжений в колонне переходит из прямоугольной (в случае центрального сжатия) в трапециевидную при неодинаковых по величине краевых напряжениях (рисунок 3.23, *a*), затем в криволинейную с нулевым значением на противоположной грани элемента. Дальнейшее увеличение

эксцентриситета приводит к появлению растягивающих напряжений в сечении и, наконец, к образованию трещин в растянутой зоне бетона (рисунок 3.23, б).

Уравнения равновесия для внецентренно сжатых элементов имеют вид:

$$N_u^\varphi = b x_c \omega_c R_b^\varphi + \sigma_{sc} A_{sc} - \sigma_{st} A_{st} - b x_t \omega_t R_{bt}^\varphi, \quad (3.77)$$

$$N_u^\varphi e_0 = b x_c \omega_c R_b^\varphi (0,5h - x_c (1 - \gamma_c)) + \sigma_{sc} A_{sc} (0,5h - a_c) + \sigma_{st} A_{st} (0,5h - a_t) + b x_t \omega_t R_{bt}^\varphi (x_c + \gamma_t x_t - 0,5h), \quad (3.78)$$

где N_u^φ – искомое продольное усилие, соответствующее исчерпанию прочности внецентренно сжатого железобетонного элемента; e_0 – эксцентриситет продольного усилия относительно оси симметрии прямоугольного сечения; b, h – размеры поперечного сечения элемента.

С учетом гипотезы плоских сечений для рассматриваемого железобетонного элемента условия совместности деформаций для внецентренно сжатых элементов, принимаются те же, что ранее рассматривались для изгибаемых элементов.

Неизвестные напряжения в сжатой и растянутой арматуре σ_{sc}, σ_{st} находятся с помощью универсальной кусочной функции (3.48–3.50), рассмотренной ранее.

Изменение сроков службы несущих конструкций каркаса объекта капитального строительства в зависимости от влажностных условий при длительной эксплуатации было ранее рассмотрено. Для того, чтобы учесть влияние параметров сечения изгибаемых железобетонных элементов на сроки их службы, перейдем к определению несущей способности (M_u) таких конструкций для различных периодов их длительной эксплуатации с учетом влажностных условий воздушной среды в помещениях гражданских зданий.

Рассчитав по предлагаемой методике прочность изгибаемого железобетонного элемента (M_u) по нормальному сечению для любого периода эксплуатации, а также определив его несущую способность, соответствующую уровню $0,69R_{bn}$, можно узнать, как изменения в размерах поперечного сечения конструкции будут влиять на продолжительность срока службы. В качестве

данных приняты результаты обследования здания школы, построенной в 1976 г. в г. Пермь [154].

Обследование здания школы было проведено в 2017 г. в связи с запланированным возведением нового здания и надземного перехода [154]. Существующее здание – трехэтажное со сборным железобетонным каркасом. Фундаменты – сборные железобетонные отдельно стоящие стаканного типа. Колонны – сборные железобетонные с размерами поперечного сечения 300×300 мм с высотой этажа 3,3 м, изготовленные по серии ИИ-04-2 вып. 7 и вып. 13. Ригели – сборные железобетонные, изготовленные по серии ИИ-04-3 вып. 4 таврового сечения с нижней полкой. Перекрытия – сборные железобетонные многопустотные плиты. Стены подвала выполнены из сборных керамзитобетонных блоков, наружные стены выполнены из однослойных самонесущих керамзитобетонных панелей.

Было проведено обследование основных несущих конструкций – фундаментов, колонн, ригелей, плит перекрытия. Конструкции были признаны работоспособными. По результатам испытаний, было установлено, что прочность бетона колонн и ригелей соответствует на момент обследования классу $B30$ [154].

Среди ригелей данной серии (крайние и средние, длиной 5,66 и 2,66 м) были рассмотрены ригели среднего пролета длиной 5,66 м как элементы, в которых возникает наибольший изгибающий момент M_{II} :

- P2-52-57, рассчитанные на нагрузку 5,2 т/м.п (обозначим как P1);
- P2-72-57, рассчитанные на нагрузку 7,2 т/м.п. (обозначим как P2).

Эти железобетонные ригели имеют тавровое поперечное сечение с нижней полкой, на консольные элементы которого впоследствии опираются многопустотные плиты перекрытия. Расчет несущей способности такого ригеля, как правило, сопровождается учетом развития процесса трещинообразования в растянутой зоне бетона, то есть в пределах высоты нижней полки. В связи с этим для таких тавровых конструкций расчет их несущей способности по нормальному сечению может выполняться без учета нижней полки, то есть как для прямоугольного сечения. Принимаем его для дальнейшего расчета.

Прямоугольная часть сечения рассматриваемых ригелей имеет размеры $200 \times 450(h)$ мм. Растянутая рабочая арматура ригеля Р1 – 2 стержня $\varnothing 32$ мм класса А400, сжатая рабочая арматура – 2 стержня $\varnothing 20$ мм класса А400. Площадь растянутой арматуры – $16,08 \text{ см}^2$ (содержание арматуры $\mu = 1,79 \%$), площадь сжатой арматуры – $1,57 \text{ см}^2$, (содержание арматуры $\mu = 0,17 \%$). Растянутая рабочая арматура ригеля Р2 – 4 стержня $\varnothing 28$ мм класса А400, сжатая рабочая арматура – 2 стержня $\varnothing 10$ мм класса А400. Площадь растянутой арматуры – $24,63 \text{ см}^2$ (содержание арматуры $\mu = 2,7 \%$), площадь сжатой арматуры – $1,57 \text{ см}^2$ (содержание арматуры $\mu = 0,17 \%$).

Расчетная длина обеих марок ригелей l_0 равна 5,6 м. Схематично поперечные сечения ригелей марок Р1 и Р2 показаны на рисунке 3.24.

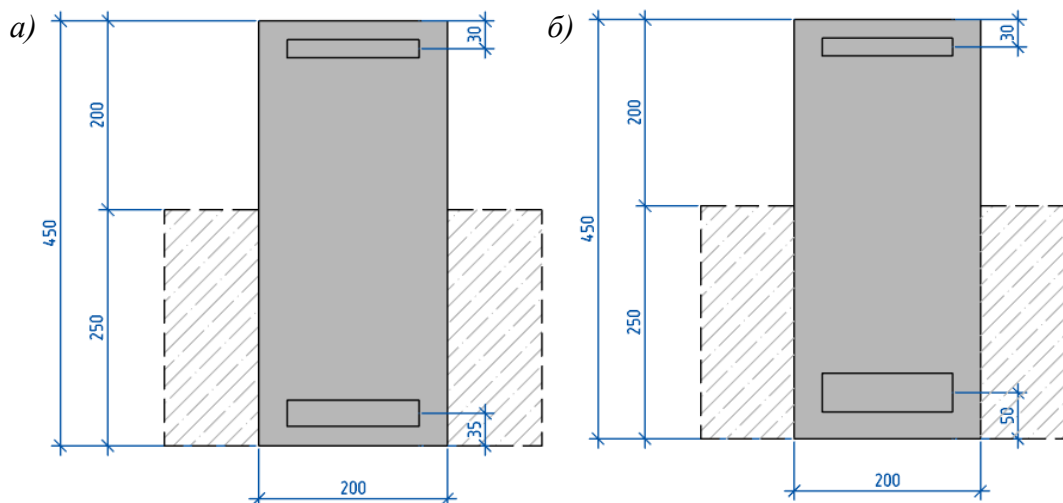


Рисунок 3.24 – Принятые для расчета несущей способности сечения ригелей Р1 (а) и Р2 (б)

Согласно серии ИИ-04-3 вып. 4 пролетные сечения заармированы с учетом наибольшей величины изгибающего момента, вычисленного по формуле:

$$M_{np} = \frac{1}{8} ql^2 - M_{on} , \quad (3.79)$$

где q – расчетная нагрузка на ригель, кН/м; l – пролет ригеля; M_{on} – опорный момент, кНм, опорные крепления и опорные участки ригелей рассчитаны на опорный момент 55 кНм, который регулируется текучестью монтажных деталей.

В таблице 3.12 представлены результаты расчета по изгибающему моменту M_u^φ железобетонных ригелей Р1 и Р2, на основании данных, полученных по результатам обследования здания школы через 40 лет эксплуатации при усредненном значении влажностных условий $\varphi = 53\%$, а также в конце прогнозируемого срока службы конструкции. Расчет был выполнен с помощью разработанной программы для ЭВМ (Приложение Б).

Таблица 3.12 – Результаты расчета параметров напряженно-деформированного состояния ригелей здания школы в г. Пермь с учетом 40 лет эксплуатации при усредненном значении влажности 53 %

Параметр	Марка ригеля	
	Р1	Р2
Размеры поперечного сечения $b \times h$, см	20 × 45	20 × 45
Расчетная длина элемента l_0 , м	5,6	5,6
Растянутая арматура (площадь A_{st} , см ²)	2Ø32A400 (16,08)	4Ø28A400 (24,63)
Сжатая арматура (площадь A_{sc} , см ²)	2Ø10A400 (1,57)	2Ø10A400 (1,57)
Расстояние от верхней грани сечения до центра тяжести сжатой арматуры a_c , см	3	3
Расстояние от нижней грани сечения до центра тяжести растянутой арматуры a_t , см	3,5	5
Опорный момент M_{on} , кНм	55	55
Нагрузка от собственного веса элемента, кН/м	3,48	3,48
Расчетная нагрузка на ригель q , кН/м	52	72
Суммарное значение расчетной нагрузки, кН/м	55,48	75,48
Суммарное значение нормативной нагрузки, кН/м	47,30	65,30
Несущая способность ригеля M_u^φ после 40 лет эксплуатации, кНм	223,197	285,034
Трещиностойкость ригеля M_{crc}^φ после 40 лет эксплуатации, кНм	48,20*	55,55*
Прогиб ригеля f_u^φ после 40 лет эксплуатации, мм	17,6*	21*
Прогнозируемая несущая способность ригеля M_u^φ в конце срока его службы, кНм	208,874	238,389
Пролетный момент M_{np} по серии, кНм	148,84	227,24
Прогнозируемый прогиб f_u^φ в конце срока службы конструкции, мм	21,8*	28*

Примечание: * параметры трещиностойкости M_{crc}^φ и прогибов f_u^φ определены для эквивалентного сечения

По методике, изложенной ранее, было рассчитано, что прогнозируемый срок службы ригеля Р1 при заданных условиях длительной эксплуатации и на

основании данных обследования составит 51 год, ригеля Р2 – 54 года. Срок безопасной эксплуатации здания определяется по меньшему значению.

На рисунке 3.25 графически выражена зависимость несущей способности ригеля Р1 от времени действия нагрузки и влажностных условий эксплуатации.

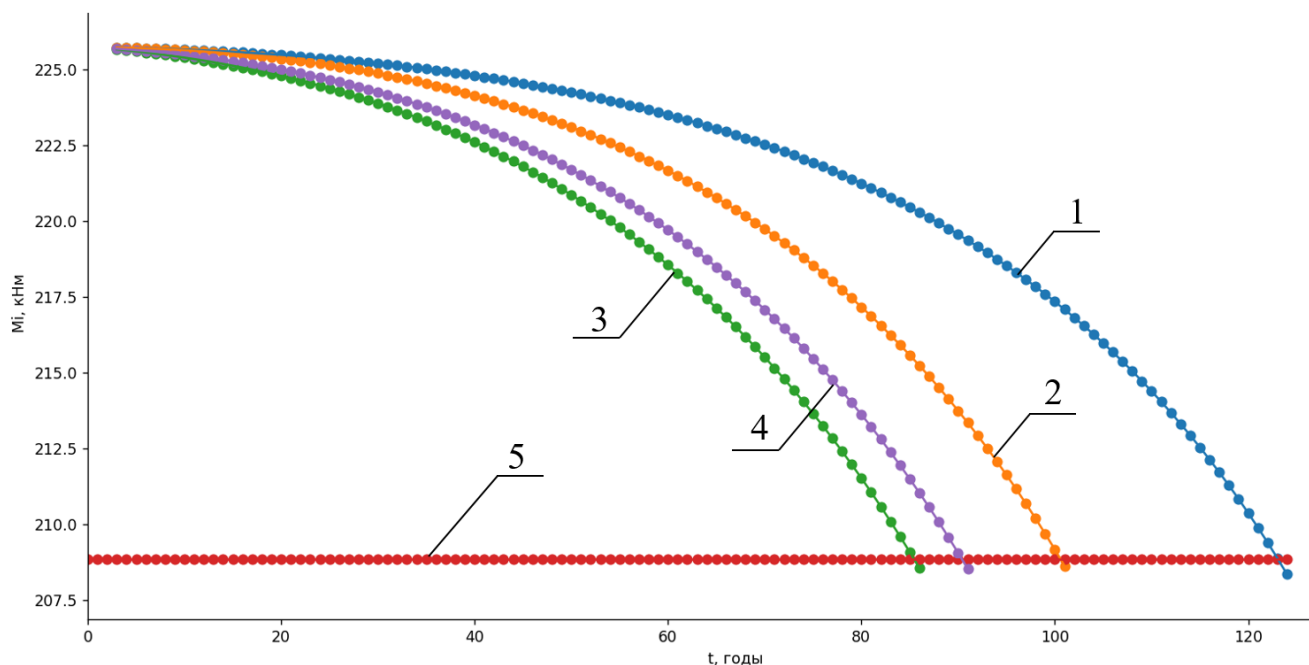


Рисунок 3.25 – Несущая способность ригеля Р1 в зависимости от влажностных условий и времени действия нагрузки: 1 – при эксплуатации в благоприятных условиях; 2 – то же, в нормальных условиях; 3 – то же, в неблагоприятных условиях; 4 – то же, при усредненной относительной влажности окружающей среды $\varphi = 53\%$; 5 – горизонтальная прямая, соответствующая несущей способности ригеля по изгибающему моменту M_u при $0,69R_{bn}$

Представленное в данной главе методическое обеспечение по выполнению расчетов прочности, трещиностойкости и деформативности изгибаемых и внецентренно сжатых железобетонных конструкций каркаса проектируемых и эксплуатируемых гражданских зданий будет способствовать выработке обоснованных управленческих решений по уточнению оставшегося срока службы несущих элементов каркаса применительно к различным вариантам их нахождения во влажностных условиях помещений.

3.4. Выводы по третьей главе

1. С помощью постулата профессора В.М. Бондаренко о постоянстве величины удельной потенциальной энергии разрушения бетона были разработаны

методики трансформирования диаграмм деформирования бетона из режима центрального кратковременного сжатия и растяжения в режим неоднородного сжатия и растяжения.

2. На основании энергетического подхода к трансформированию диаграмм деформирования бетона получена методика, позволяющая преобразовать параметры диаграмм кратковременного неоднородного сжатия и растяжения в их аналоги для длительного режима нагружения.

3. Были уточнены параметры предельных сопротивлений при неоднородном сжатии и соответствующих относительных деформаций для всех классов бетона при их длительной эксплуатации для трех диапазонов влажностных условий.

4. Были рассчитаны параметры предельных сопротивлений и относительных деформаций бетона всех классов при неоднородном растяжении для трех диапазонов влажностных условий эксплуатации.

5. Разработана методика определения деформативно-прочностных характеристик бетона несущих железобетонных конструкций с учетом их длительной эксплуатации в различных влажностных условиях. Реализация разработанной методики позволяет определить параметры деформативно-прочностных свойств бетона, деформируемого в сжатой и растянутой зонах несущих железобетонных конструкций в любой момент времени длительно эксплуатируемых гражданских зданий.

6. Была разработана методика определения параметров НДС изгибаемых и внецентренно сжатых конструкций в любой момент времени длительно эксплуатируемых объектов капитального строительства.

4. РАЗРАБОТКА И ОБУЧЕНИЕ МОДЕЛИ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

4.1. Формирование датасета для обучения модели искусственной нейронной сети

В рамках данного исследования разработан обучающий датасет для здания школы, включающий климатические показатели г. Белгород и относительную влажность помещений за 50 лет, параметры, оказывающие влияние на несущую способность изгибаемого элемента, на основании которых был рассчитан остаточный ресурс конструкций.

Здание – школа на 1176 учащихся, построенная в 1976 г. по типовому проекту 222-1-193/75 со сборным железобетонным каркасом серии ИИ-04 [155]. Здание состоит из четырех корпусов, размещенных в форме квадрата [156]. В здании три этажа. Несущий железобетонный каркас включает в себя сборные железобетонные колонны, ригели, плиты перекрытия и покрытия, а также навесные стеновые панели. На рисунке 4.1 представлены фасады здания в осях 1-14 и в осях А-М.

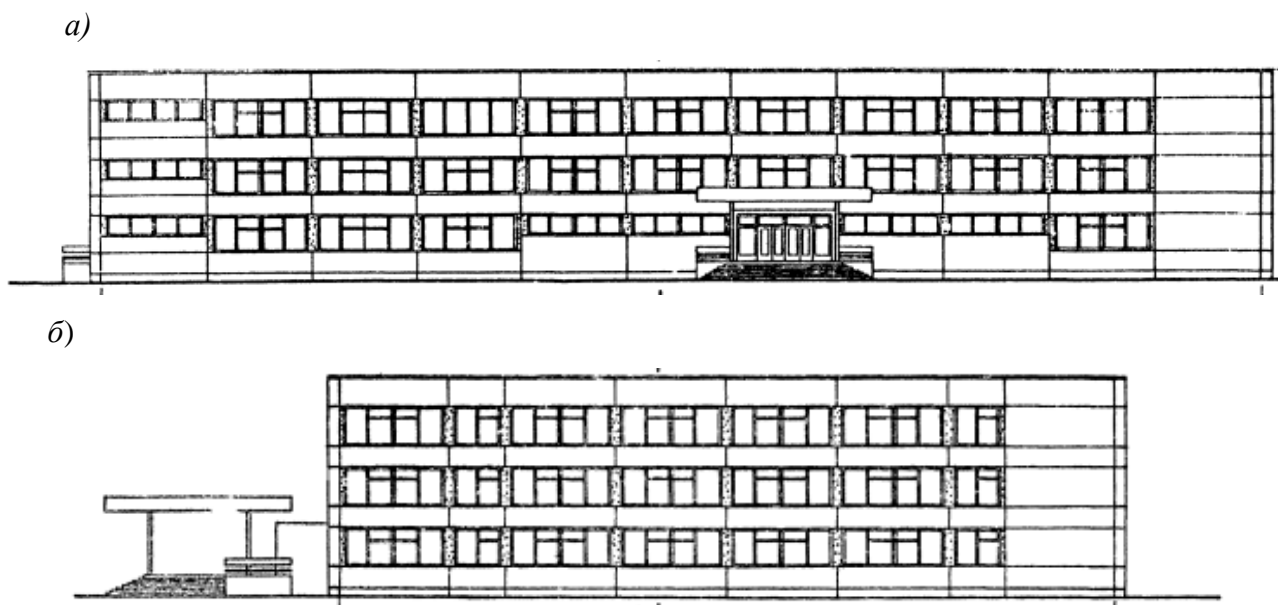


Рисунок 4.1 – Фасады здания школы на 1176 учащихся в г. Белгород (типовой проект 222-1-193/75): а – фасад в осях 1-14; б – фасад в осях А-М

На рисунке 4.2 показаны выбранные для формирования датасета ригели, обозначенные как конструкции 101, 102, 103, 104. В качестве конструкции 101

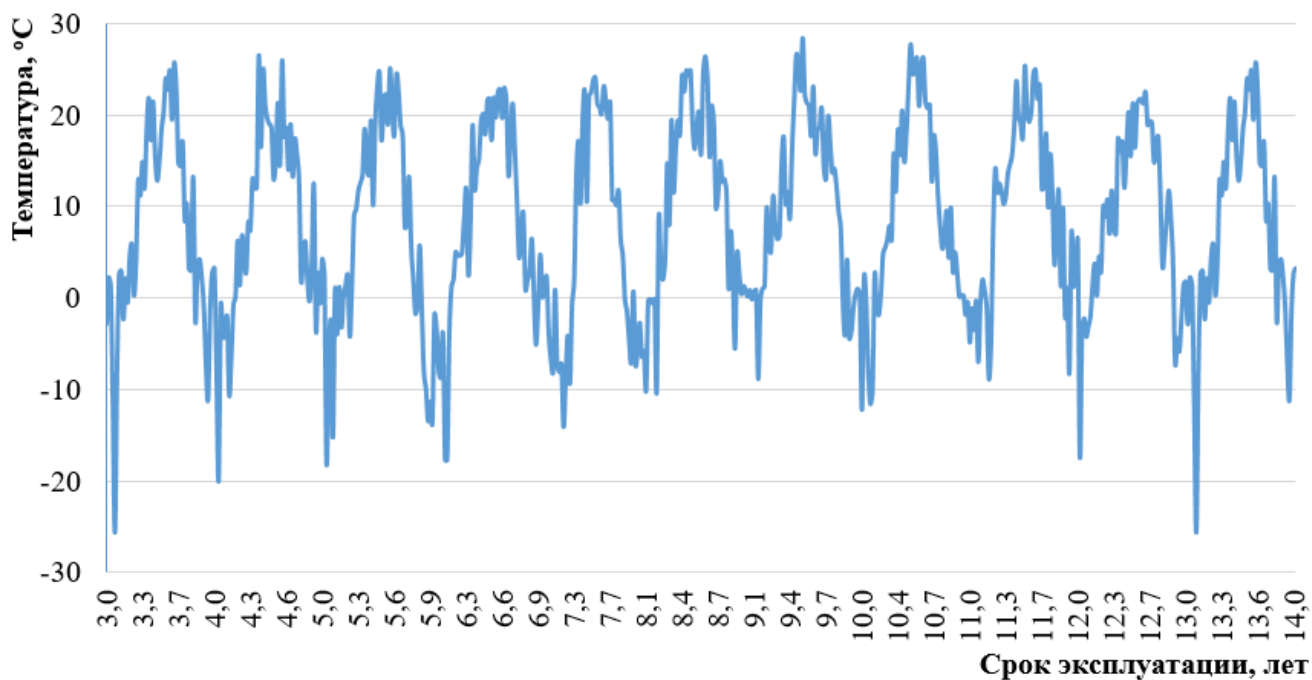


Рисунок 4.3 – Температура наружного воздуха в г. Белгород за первые 10 лет эксплуатации

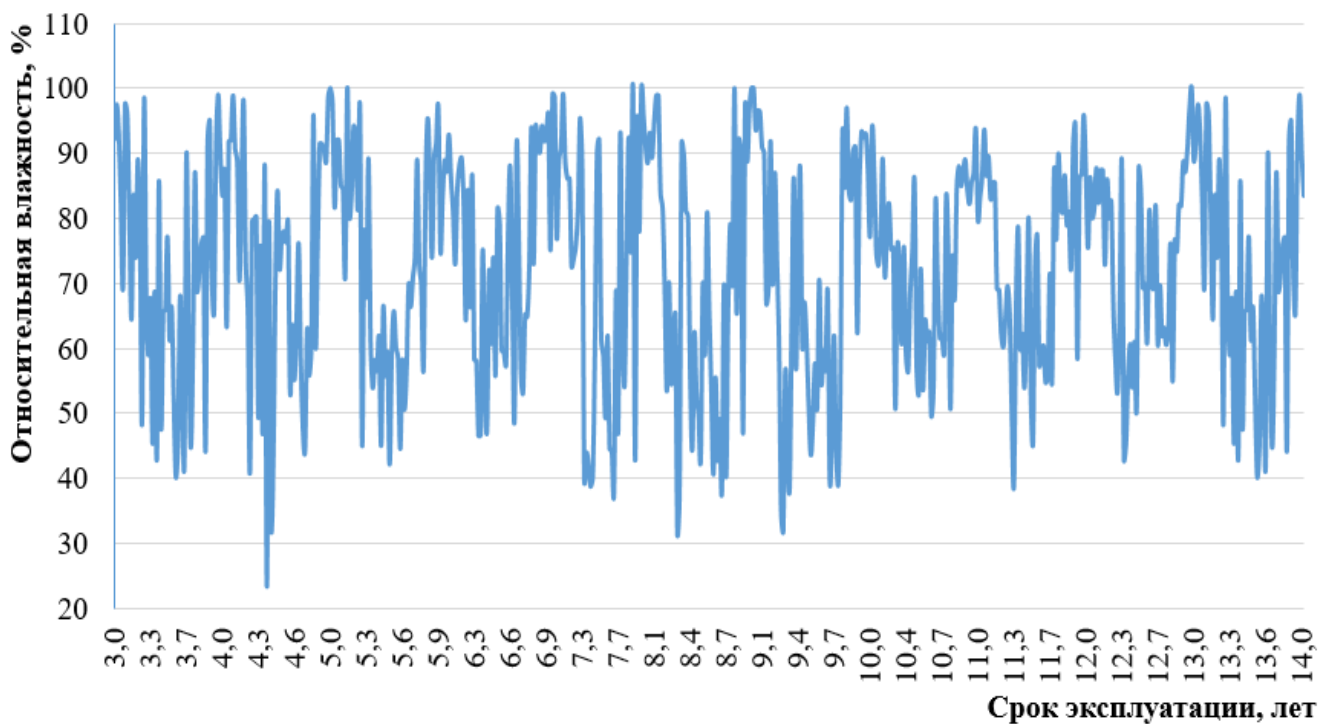


Рисунок 4.4 – Относительная влажность наружного воздуха в г. Белгород за первые 10 лет эксплуатации

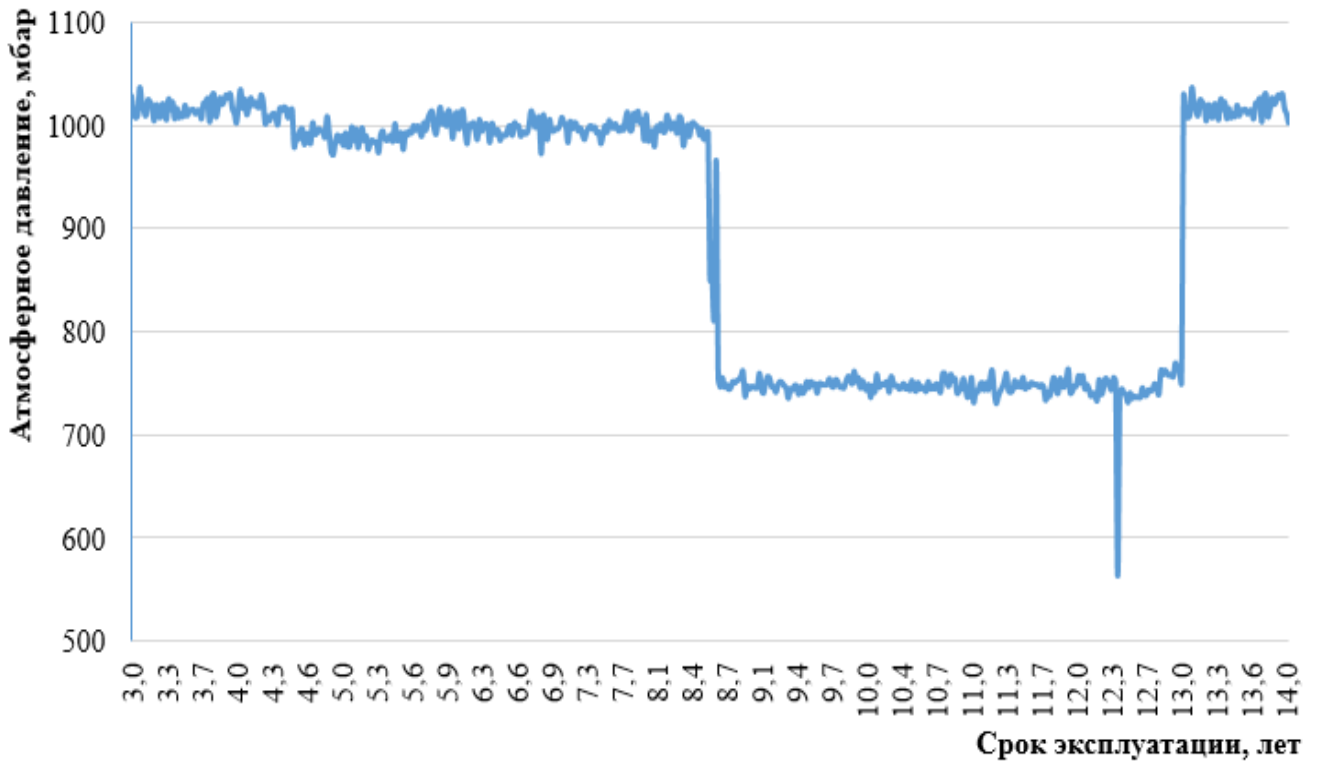


Рисунок 4.5 – Атмосферное давление в г. Белгород за первые 10 лет эксплуатации

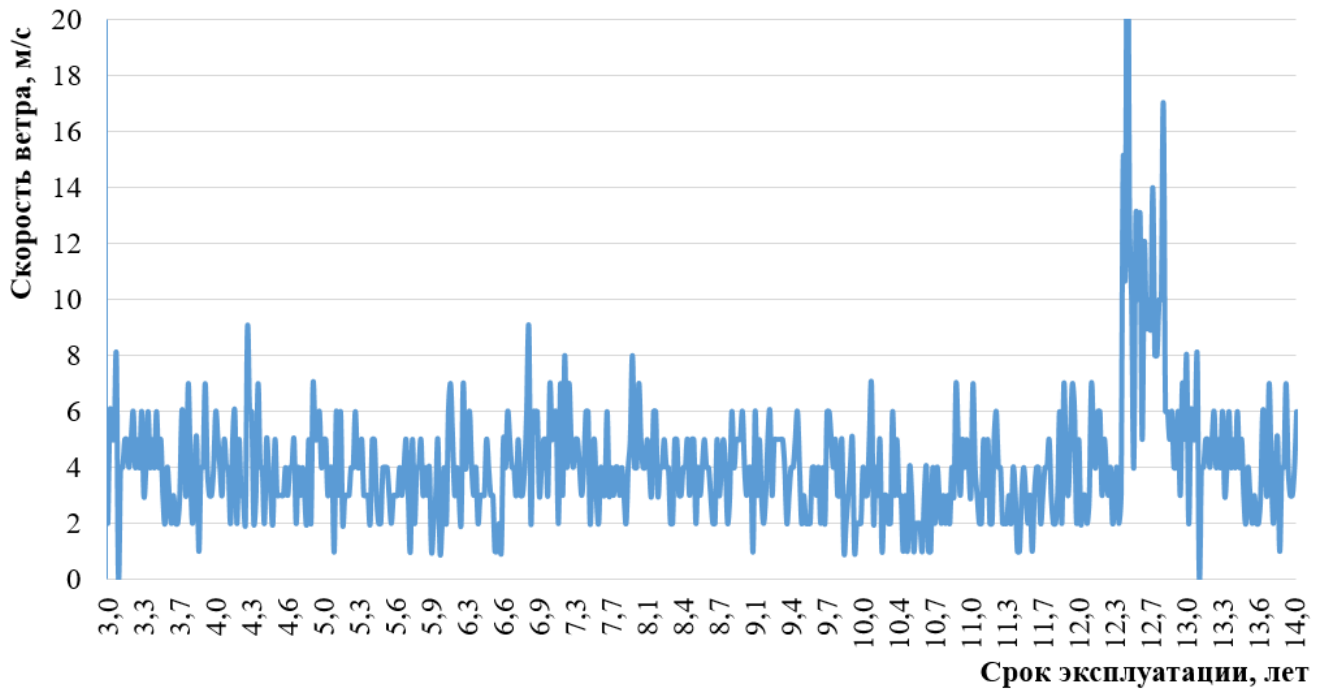


Рисунок 4.6 – Скорость ветра в г. Белгород за первые 10 лет эксплуатации

Фрагмент обучающего датасета приведен в Приложении Г.

4.2. Оптимизация архитектуры искусственной нейронной сети

В ходе проведения вычислительного эксперимента реализована системная серия численных испытаний, направленных на выявление и анализ функциональной зависимости между архитектурными параметрами нейронной сети, в частности, числом нейронов во внутреннем слое, и ее прогностическими характеристиками. Варьирование архитектурных параметров модели осуществлялось путем изменения количества элементов скрытого слоя, что обеспечило охват полного спектра поведенческих режимов модели: от состояния недостаточной обучаемости до режима чрезмерной адаптации.

Результаты, полученные в ходе численного моделирования и отражающие временную динамику эволюции метрик качества – среднеквадратической ошибки на обучающем подмножестве (Training RMSE), среднеквадратической ошибки на контрольном подмножестве (Test RMSE), коэффициента детерминации R^2 и временных затрат на реализацию обучающего процесса – представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Зависимость метрик качества прогнозирования и времени обучения от числа нейронов

Число нейронов на внутреннем слое	Training RMSE	Test RMSE	Коэффициент детерминации R^2 (Test)	Время обучения, с
1	2	3	4	5
2	3,50	3,80	0,58	5
4	2,90	3,20	0,65	8
6	2,50	2,80	0,71	11
8	2,20	2,60	0,76	14
10	2,00	2,40	0,80	17
12	1,85	2,35	0,82	20
14	1,75	2,25	0,84	23
16	1,68	2,21	0,86	26
18	1,62	2,18	0,86	29
20	1,58	2,15	0,87	33
22	1,55	2,13	0,87	35
24	1,52	2,13	0,87	38
26	1,50	2,12	0,88	41
28	1,49	2,13	0,88	44
30	1,47	2,14	0,88	47
32	1,46	2,15	0,88	50

1	2	3	4	5
34	1,45	2,16	0,87	53
36	1,44	2,18	0,87	56
38	1,43	2,20	0,87	59
40	1,42	2,22	0,87	52
42	1,41	2,24	0,86	65
44	1,41	2,26	0,86	68
46	1,40	2,28	0,86	71
48	1,40	2,30	0,85	74
50	1,40	2,32	0,85	77

Анализ экспериментальных данных, представленных в таблице 4.1, позволяет выделить три диапазона, характеризующих поведение разработанной модели ИНС.

Первая зона (2–10 нейронов) демонстрирует эффект недостаточной аппроксимирующей способности модели. Архитектура в этом диапазоне обладает ограниченным потенциалом для воспроизведения сложных нелинейных закономерностей динамики микроклиматических параметров, что подтверждается высокими значениями среднеквадратической ошибки (Training RMSE = 3,50–2,00; Test RMSE = 3,80–2,40) и минимальными значениями коэффициента детерминации ($R^2 = 0,58–0,80$). Однако в данном диапазоне наблюдается наиболее интенсивное снижение ошибки при добавлении каждого нейрона, что указывает на высокую отдачу от архитектурного усложнения на начальном этапе.

Вторая зона (12–30 нейронов) соответствует оптимальному режиму работы модели. При достижении 26 нейронов фиксируется глобальный минимум ошибки на контрольном подмножестве (RMSE = 2,12) и максимум коэффициента детерминации ($R^2 = 0,88$). В данном интервале достигается стабильное извлечение существенных закономерностей без запоминания компонентов обучающей выборки.

Третья зона (свыше 30 нейронов) характеризуется переобучением, где, начиная с 32 нейронов, ошибка на обучающих данных продолжает снижаться

(до 1,40), тогда как на контрольных – возрастает. Данное расхождение свидетельствует о снижении обобщающей способности и избыточной адаптации к специфике обучающего набора. При этом вычислительные затраты на обучение превышают 77 с, что делает такие архитектуры практически нецелесообразными.

С целью формализации процедуры выбора оптимальных архитектурных параметров предложен коэффициент вычислительной эффективности, определяемый как отношение величины уменьшения погрешности модели к приросту вычислительных затрат времени. Результаты проведенного сравнительного анализа в соответствии с предложенным критерием представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Сравнительный анализ эффективности различных архитектур нейронной сети

Диапазон нейронов	Среднее снижение Test RMSE	Средний прирост времени, с	Коэффициент эффективности	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)

Данные, представленные в таблице 4.2, свидетельствуют о том, что в диапазоне 2–10 нейронов коэффициент вычислительной эффективности достигает максимальных значений (0,117), что обосновывает целесообразность архитектурного усложнения модели на данном участке. В интервале 12–30 нейронов указанный коэффициент снижается до величины 0,012, однако приращение точности моделирования сохраняет положительный знак, что свидетельствует о продолжающемся улучшении прогностических характеристик. В области свыше 30 нейронов коэффициент вычислительной эффективности переходит в отрицательную область значений, что служит индикатором качественного ухудшения прогностических характеристик при одновременном увеличении вычислительных затрат на реализацию обучающего процесса [157].

Анализ фактического распределения параметров микроклиматических режимов в точке оптимума (26 нейронов) выявляет высокую степень согласованности между экспериментальными данными и прогнозными оценками разработанной модели ИНС. Установленная закономерность позволяет сделать вывод о том, что для решения задач прогностического моделирования тепловлажностных режимов помещений при текущей размерности входного вектора информации применение архитектурных конфигураций, содержащих более 30 нейронов во внутреннем слое, представляется методологически и экономически нецелесообразным.

Таким образом, на основании проведенных исследований можно сделать вывод о том, что применение моделей ИНС с оптимизацией архитектурных параметров содействует значительному повышению точностных характеристик прогнозирования и способствует улучшению показателей энергетической эффективности зданий. Полученные результаты демонстрируют, что оптимальный диапазон количества нейронов во внутреннем слое для рассматриваемого класса задач прогнозирования составляет от 20 до 30 элементов. Данная архитектурная конфигурация обеспечивает минимизацию среднеквадратической ошибки прогнозирования ($RMSE = 2,12-2,14$) при сохранении приемлемых временных затрат на реализацию обучающего процесса.

4.3. Обучение модели искусственной нейронной сети

В рамках данного исследования использовался датасет, включающий в себя результаты расчетно-экспериментальных исследований, описанных в п. 4.1.

Архитектура разработанной ИНС, используемой в настоящем исследовании для решения задач интеллектуального анализа экспериментальных данных и формирования прогнозных оценок остаточного ресурса гражданского здания, графически отображена на рисунке 4.7. Разработанная топология сети представляет собой многослойный персептрон с применением передачи сигнала, обеспечивающий возможность аппроксимации нелинейных зависимостей,

обеспечивающую сложность между входными параметрами и включенную переменную.

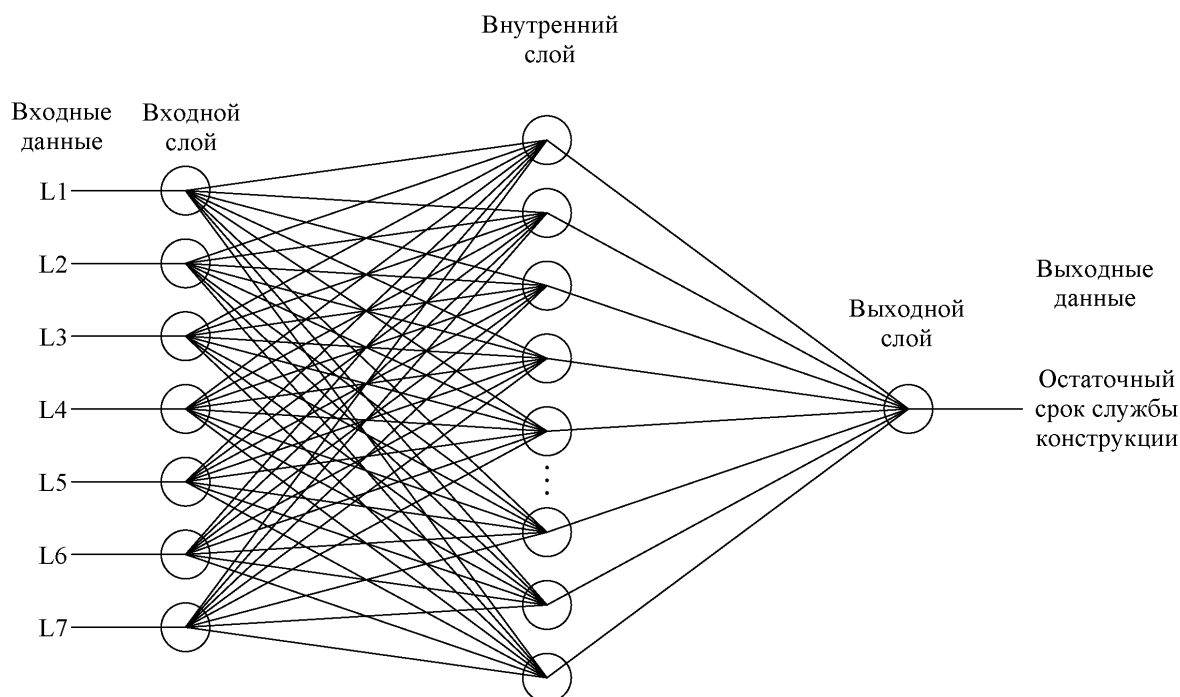


Рисунок 4.7 – Структура разработанной ИНС

Сформированный датасет охватывал полный спектр входных критериев, включая экстремальные – как максимальные, так и минимальные – значения всех признаков, задействованных при построении прогнозной модели. Подобная стратегия формирования выборок обучения обеспечивает необходимую степень репрезентативности данных, что способствует обеспечению обобщающей способности нейросетевой модели и ее устойчивой адаптации к разнородным переменным сетям.

В процессе тренировки нейросетевой модели осуществлялась итеративная корректировка синаптических весов межнейронных связей с использованием метода обратного распространения ошибки, направленная на постепенное снижение величины функции потерь (ошибки аппроксимации) на обучающей подвыборке. Принятая методика настройки параметров сохранения целостности процедур обучения: предупреждалось как нежелательное затирание ранее накопленных закономерностей (катастрофическое забывание), а также явление

переобучения, при котором модель начинает воспроизводить случайный шум тренировочных данных вместо определения устойчивых зависимостей.

Нейросетевые модели с использованием систематического тестирования при включении количества числовых элементов в скрытом слое многослойного персептрона с идентификацией местоположения обеспечивают настройку конфигурации сети. Критериями отбора считается значение среднеквадратичной ошибки, а также степень соответствия прогнозных результатов на тестовой подвыборке с фактическими экспериментальными данными. Проведенный вычислительный эксперимент показал, что ограниченная аппроксимационная точность нейросетевой модели для обучающего датасета наблюдается при размещении 26 нейронов в скрытом слое, причем при данных схемах максимальное значение эффективности как на тренировочной, так и на тестовой подвыборке находится в интервале от 0,978 до 0,990.

Оптимальная архитектура нейросетевой модели для разработанного датасета с признаком топологии 8-26-1, где первое число обозначает размерность входного вектора признаков, второе – число нейронов скрытого слоя, третье – количество выходных элементов сети. Количественные результаты процедур обучения искусственной нейронной сети для рассматриваемого датасета представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Результаты обучения ИНС для обучающего датасета

Индекс	Имя	Эффективность			Training RMSE	Test RMSE	Validation RMSE
		Тренировка	Тест	Валидация			
1	2	3	4	5	6	7	8
1	MLP 8-30-1	0,98530	0,97860	0,99013	1,470	2,140	0,975
2	MLP 8-30-1	0,98524	0,97852	0,99012	1,476	2,148	0,976
3	MLP 8-29-1	0,98520	0,97865	0,99013	1,480	2,135	0,975
4	MLP 8-29-1	0,98516	0,97865	0,99012	1,485	2,135	0,976
5	MLP 8-28-1	0,98510	0,97870	0,99013	1,490	2,130	0,975
6	MLP 8-28-1	0,98504	0,97865	0,99012	1,496	2,135	0,977
7	MLP 8-27-1	0,98510	0,97870	0,99013	1,490	2,130	0,975
8	MLP 8-27-1	0,98421	0,97872	0,99012	1,579	2,128	0,976
9	MLP 8-26-1	0,98500	0,97880	0,99062	1,500	2,120	0,880
10	MLP 8-26-1	0,98421	0,97872	0,99057	1,579	2,128	0,889
11	MLP 8-25-1	0,98490	0,97880	0,99062	1,510	2,120	0,880

1	2	3	4	5	6	7	8
12	MLP 8-25-1	0,98482	0,97861	0,99063	1,518	2,139	0,878
13	MLP 8-24-1	0,98471	0,97862	0,99062	1,529	2,138	0,880
14	MLP 8-24-1	0,98480	0,97870	0,99067	1,520	2,130	0,870
15	MLP 8-23-1	0,98452	0,97861	0,99065	1,548	2,139	0,874
16	MLP 8-23-1	0,98460	0,97870	0,99067	1,540	2,130	0,870
17	MLP 8-22-1	0,98442	0,97862	0,99062	1,558	2,138	0,879
18	MLP 8-22-1	0,98450	0,97870	0,99067	1,550	2,130	0,870
19	MLP 8-21-1	0,98422	0,97852	0,99063	1,578	2,148	0,878
20	MLP 8-21-1	0,98422	0,97852	0,99063	1,578	2,148	0,878
21	MLP 8-20-1	0,98420	0,97850	0,99067	1,580	2,150	0,870
22	MLP 8-20-1	0,98412	0,97842	0,99065	1,588	2,158	0,874

Корректность подбора обучающихся данных для тренировки нейросетевых моделей проверяется посредством анализа диаграммы прогнозирования представленной на рисунке 4.8.

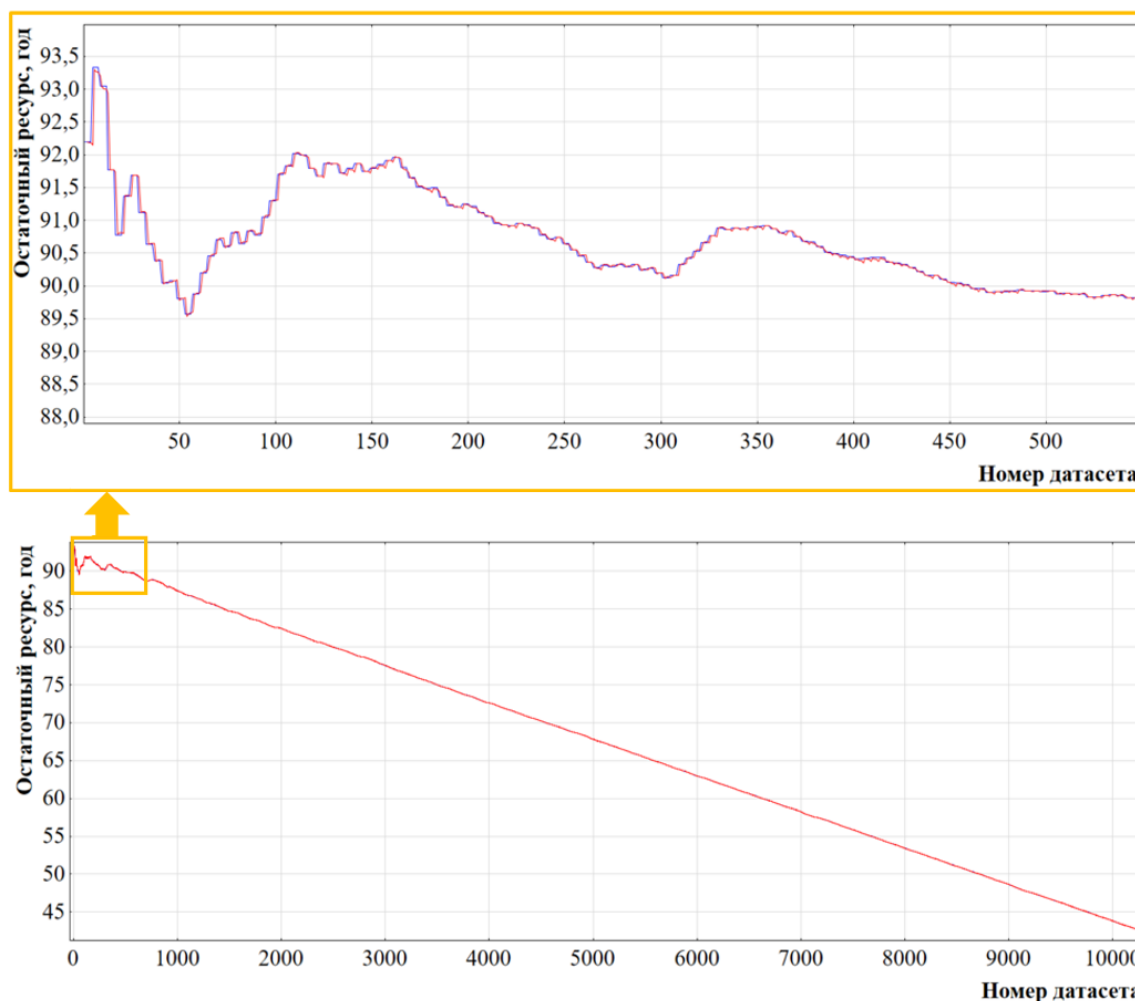


Рисунок 4.8 – График прогнозов для сети с выборкой тренировки, теста и валидации на основе обучающего датасета: — фактические значения; — прогнозные значения

При выявленных графических зависимостях на рисунке 4.8 прослеживается выраженная степень схождения между фактическими и расчетными значениями определяющих показателей.

Высокая сходимость между экспериментальными и прогнозируемыми значениями на представленных графических зависимостях свидетельствует о том, что нейросетевая модель способна с высокой достоверностью определять закономерности и механизмы взаимосвязи, заложенные в последовательном изменении данных. Данное обстоятельство свидетельствует о том, что информационная база, используемая сеть для обучения, в достаточной мере отражает характерные особенности изменения остаточного ресурса объекта капитального строительства, что, в традиционном счете, подтверждает обоснованность общепринятой стратегии формирования обучающих выборок.

Результаты, полученные обученной нейросетевой моделью в сравнении с экспериментальными величинами из обучающего датасета, показаны на рисунке 4.9.

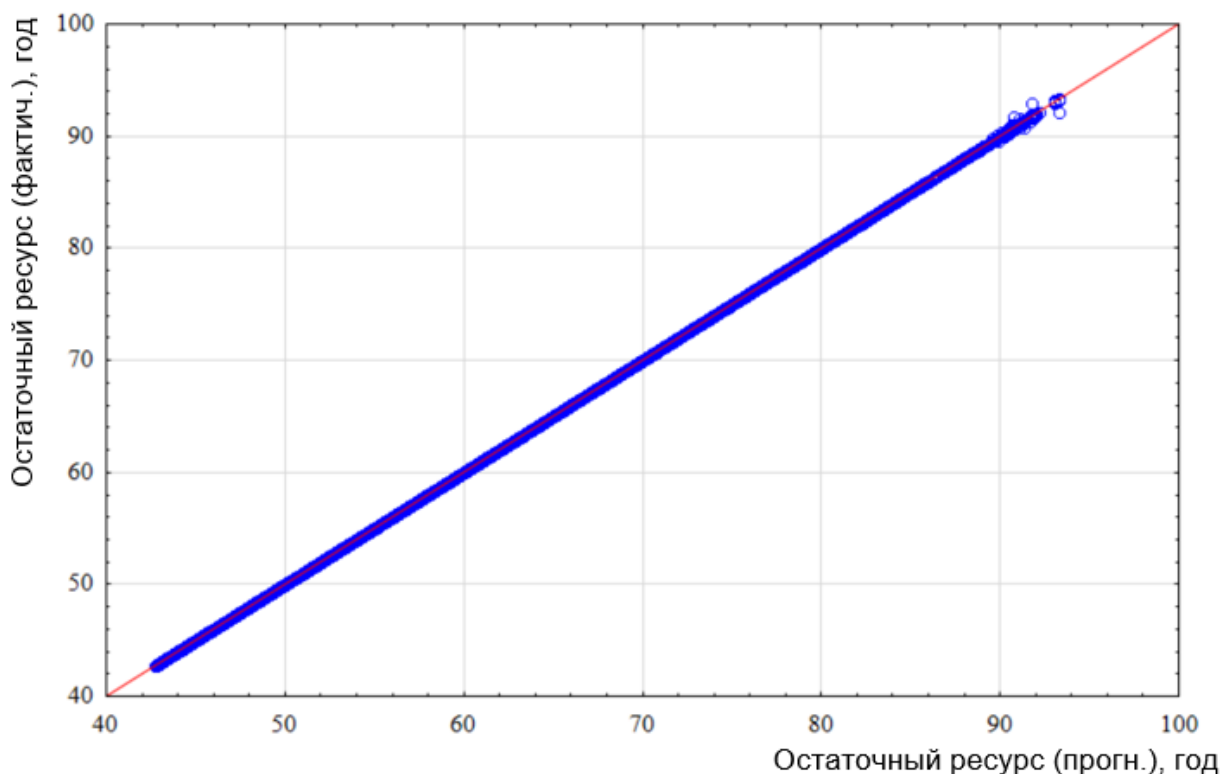


Рисунок 4.9 – Результаты обучения ИНС для данных обучающего датасета

Анализ приведенной графической зависимости позволяет констатировать, что расчетные значения остаточного ресурса гражданского здания, полученные в результате применения разработанной модели ИНС, демонстрируют высокую степень соответствия к эталонным значениям, зафиксированным в наборе данных. Высокая плотность точек на прямой, отображающей соответствие между фактическими и прогнозными значениями, является индикатором высокой степени адекватности аппроксимирующей функции нейросетевой модели. Плотное расположение экспериментальных точек вдоль линии соответствия подтверждает, что разработанная модель обеспечивает необходимую точность и вычислительную эффективность при необходимости прогнозирования остаточного ресурса объекта капитального строительства.

Гистограмма остатков, представленная на рисунке 4.10, демонстрирует, что остатки (разница между фактическими и прогнозируемыми значениями) соответствуют нормальному закону распределения Гаусса-Лапласа: наблюдается характерная область колоколообразной формы распределения с выраженной симметрией относительно нулевого значения и небольшой наблюдаемой вероятности в центральной части.

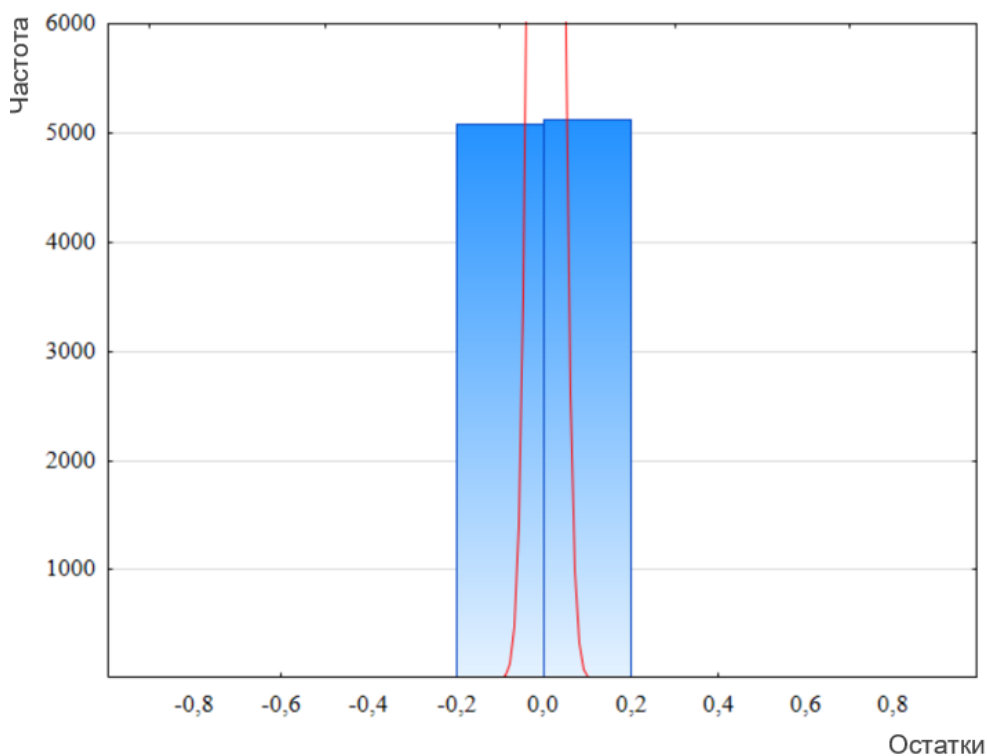


Рисунок 4.10 – Гистограмма остатков временного ряда для данных обучающего датасета

Подобный характер распределения остаточных отклонений свидетельствует о том, что нейросетевая модель адаптации воспроизводит цепи в зависимости от данных, а систематическая составляющая погрешности прогнозирования практически отсутствует, что является стандартным условием корректности регрессионной модели. Совокупность данных условий дополнительно подтверждает основную прогностическую способность и вычислительную эффективность с созданной нейросетевой моделью.

Полученные результаты прогнозирования, осуществленного с использованием разработанной в настоящем диссертационном исследовании модели ИНС, следует признать адекватными со значением среднеквадратичной ошибки, не превышающем 1,2, обеспечивающими устойчивые зависимости и формирование последовательных прогнозных оценок. Помимо этого, выбранная архитектура и совокупность настраиваемых гиперпараметров нейросетевых моделей получили всестороннее обоснование, исходя из специфики решаемых прогнозных задач и естественных анализируемых данных. Определение параметров скрытых слоев, количества нейронов в каждой структуре, а также других структурных и алгоритмических параметров проводных сетей производилось с учетом размерности входных пространств, признаков, объема расположенных обучающихся выборок и требований к точности прогнозирования, что в определении обеспечивает обоснованность и верификацию применяемых моделей.

4.4. Оценка валидации разработанной модели искусственной нейронной сети

С целью верификации прогностической способности и оценки степени связывания алгоритмических нейросетевых моделей была проведена процедура их внешней валидации на независимом наборе данных, не участвовавшая в процессе обучения и первоначального тестирования. Исследование данного этапа является принципиально значимым, поскольку именно эта модель позволяет получить достоверные прогнозные оценки на ранее не предъявляющие данные,

определяющие критерий ее практической применимости при решении инженерных задач в области управления жизненным циклом объектов капитального строительства. В качестве нового датасета использовались данные обследования школы в г. Пермь, информация о котором была ранее представлена в главе 3.

Формирование независимого валидационного набора данных производилось по методике, соответствующей процедурам подготовки обучающихся выборок, с соблюдением требований к полноте и корректности входных параметров. Принципиально обусловленным обстоятельством является то, что данные валидационного набора были получены для объекта капитального строительства, расположенного в ином климатическом районе и отличающегося рядом конструктивных особенностей, что обеспечивает объективность оценок обобщающей способности нейросетевой модели.

Обученная нейросетевая модель и параметры архитектуры были зафиксированы в результате предшествующего этапа оптимизации и были применены к валидационному набору данных без дополнительных корректировок синаптических весов межнейронных связей. Данный подход позволяет объективно оценить возможность экстраполяции ранее установленных правил на новые, не участвовавшие в изучении примеров данных, что является ключевым требованием при верификации прогнозных инструментов, предназначенных для практического применения в средней поддержке принятия решений.

Графическое измерение прогнозных результатов остаточного ресурса объекта капитального строительства на валидационном датасете представлено на рисунке 4.11.

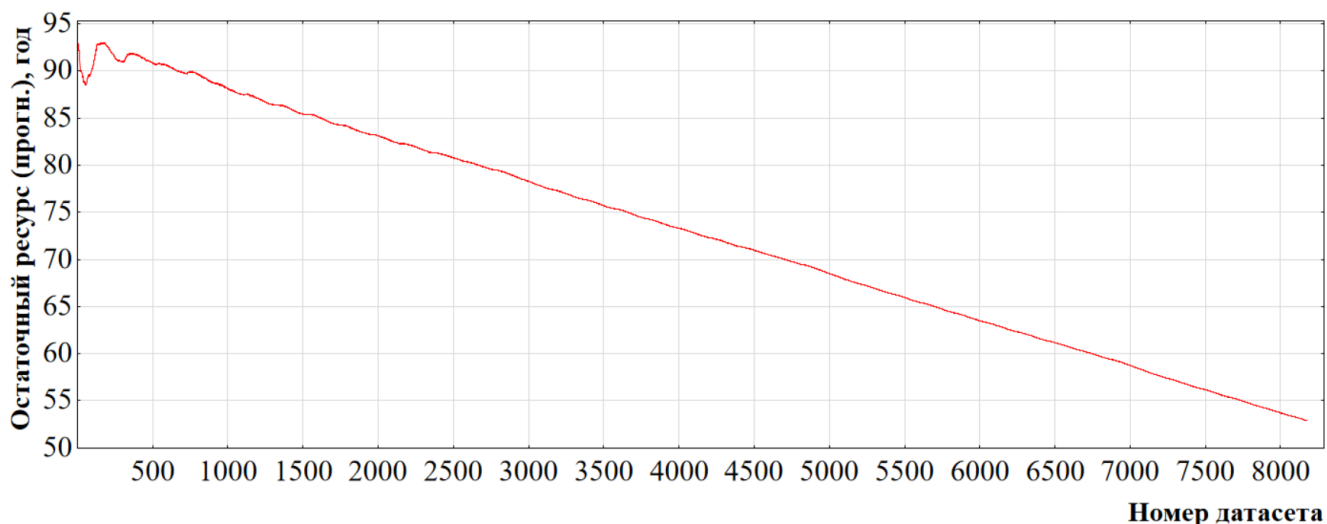


Рисунок 4.11 – График распределения прогнозных результатов остаточного ресурса здания школы в г. Пермь для валидационного датасета

По результатам данных обследования здания школы в г. Пермь со сборным железобетонным каркасом той же серии, которая применялась для строительства здания школы в г. Белгород, с помощью методики, изложенной в главе 3, было рассчитано, что прогнозируемый срок службы четырех ригелей с учетом схожих условий эксплуатации при заданных условиях длительной эксплуатации и на основании данных обследования составит 51 год. По результатам расчета остаточного ресурса с помощью искусственной нейронной сети для четырех конструкций значение остаточного ресурса составило 52,9 года. Относительное отклонение с учетом большого массива данных минимально и составляет 3,7 %. Обученная искусственная нейронная сеть может применяться для прогнозирования сроков остаточного ресурса гражданских зданий со сборным железобетонным каркасом на основании условий их эксплуатации.

4.5. Выводы по четвертой главе

1. Сформирован репрезентативный обучающий датасет для прогнозирования остаточного ресурса гражданского здания на основе комплексных данных по зданию школы в г. Белгород. Структура датасета обеспечивает покрытие полного диапазона входных признаков, включая граничные значения климатических

параметров и конструктивных характеристик, что является необходимым условием для формирования обобщающей способности нейросетевой модели.

2. Установлено, что архитектура искусственной нейронной сети с количеством нейронов во внутреннем слое от 20 до 30 обеспечивает оптимальный баланс между аппроксимационной точностью и устойчивостью к переобучению. Минимальное значение среднеквадратической ошибки на контрольной выборке достигается при 26 нейронах в скрытом слое, тогда как дальнейшее увеличение числа нейронов приводит к деградации обобщающей способности модели при одновременном росте вычислительных затрат.

3. Разработанная модель ИНС с топологией 8-26-1 продемонстрировала высокую точность прогнозирования: коэффициент детерминации на тестовой выборке составил 0,88, а распределение остатков соответствует нормальному закону, что подтверждает отсутствие систематических погрешностей и адекватность регрессионной аппроксимации.

4. Внешняя валидация обученной нейросетевой модели на независимом датасете (здание школы в г. Пермь, отличающееся климатическими условиями) подтвердила ее обобщающую способность: сохранение точностных характеристик в условиях экстраполяции свидетельствует о выявлении физически обоснованных закономерностей деградации конструкций, а не запоминании специфики обучающей выборки.

5. Сравнительный анализ результатов нейросетевого прогнозирования остаточного ресурса здания школы в г. Пермь со значениями, полученными на основании результатов обследования, позволяет сделать вывод о том, что обученная искусственная нейронная сеть может применяться для прогнозирования сроков остаточного ресурса гражданских зданий со сборным железобетонным каркасом, на основании влажностных условий их эксплуатации.

5. РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО УПРАВЛЕНИЮ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ОБЪЕКТОВ КАПИТАЛЬНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА С УЧЕТОМ ИХ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ, УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ И ОПТИМАЛЬНОГО СРОКА СЛУЖБЫ

5.1. Разработка механизма принятия управленческих решений на этапе проектирования объекта капитального строительства

5.1.1. Получение и интерпретация прогнозных значений остаточного ресурса объекта капитального строительства

Разработанный в диссертационном исследовании подход к управлению жизненным циклом объектов капитального строительства реализован на основе системного применения обученной модели искусственной нейронной сети для количественной оценки остаточного ресурса здания на ранних стадиях проектирования.

Суть предложенного подхода заключается в трансформации традиционной реактивной стратегии технического обслуживания, при которой ремонтные и восстановительные мероприятия назначаются преимущественно после визуального выявления критических дефектов или аварийных ситуаций, в проактивную модель управления техническим состоянием. Проактивная модель базируется на прогнозировании динамики деградационных процессов в строительных конструкциях с учетом совокупного и взаимосвязанного влияния климатических воздействий, конструктивных особенностей объекта, физико-механических свойств применяемых материалов и режима эксплуатационных нагрузок.

Обученная в главе 4 нейросетевая модель функционирует как цифровой двойник проектируемого объекта, позволяющий на этапе разработки проектной документации количественно оценить долгосрочные последствия принятых конструктивных и технологических решений. Модель обеспечивает возможность имитационного прогнозирования изменения технического состояния критичных элементов здания после 50–100 лет эксплуатации, что дает проектировщику инструмент для сравнительного анализа альтернативных вариантов

конструктивных решений не только по критериям первоначальной стоимости и трудоемкости возведения, но и по показателям долговечности и эксплуатационной надежности. Данный подход создает предпосылки для формирования обоснованного плана ремонтно-восстановительных мероприятий на весь расчетный срок службы объекта еще до его ввода в эксплуатацию. Это, в свою очередь, обеспечивает минимизацию приведенных затрат жизненного цикла объекта строительства за счет оптимизации баланса между первоначальными капитальными вложениями в возведение здания и последующими эксплуатационными расходами, включая периодичность и стоимость текущих и капитальных ремонтов, а также затраты на аварийные восстановительные работы.

В качестве верификационного примера применения разработанной методологии использованы данные по проектируемому объекту капитального строительства, расположенному в г. Самара в климатическом районе с выраженными климатическими характеристиками, существенно отличающимися от условий формирования обучающего датасета.

Планируемый к строительству объект – здание школы на 990 учащихся, типовой проект № 6(8374) со сборным железобетонным каркасом.

Верификация на объекте, не репрезентативном для обучающей выборки, позволяет оценить устойчивость модели к изменению статистических свойств входных данных и подтвердить ее применимость для решения практических задач в различных географических и климатических зонах строительства.

При подготовке входных данных для прогнозирования выполнена адаптация исходной проектной документации к формату, требуемому нейросетевой моделью. Климатические параметры приведены к понедельным усредненным значениям за многолетний период наблюдений (не менее 30 лет) по данным официальных метеорологических станций, расположенных в непосредственной близости от площадки строительства [120].

Для прогнозирования остаточного ресурса здания школы в г. Самара применена оптимизированная модель искусственной нейронной сети с топологией 8-26-1, прошедшая полный цикл обучения, кросс-валидации и

внутренней верификации в соответствии с методикой, изложенной в п. 4.3. Выбранная архитектура сети была идентифицирована в ходе систематического перебора конфигураций как обеспечивающая оптимальный баланс между аппроксимационной точностью и устойчивостью к переобучению. Вектор входных признаков модели включает восемь нормализованных параметров, охватывающих ключевые факторы, влияющие на деградацию строительных конструкций.

Результатом прогнозирования является численное значение остаточного ресурса здания в годах, представленное на рисунке 5.1.

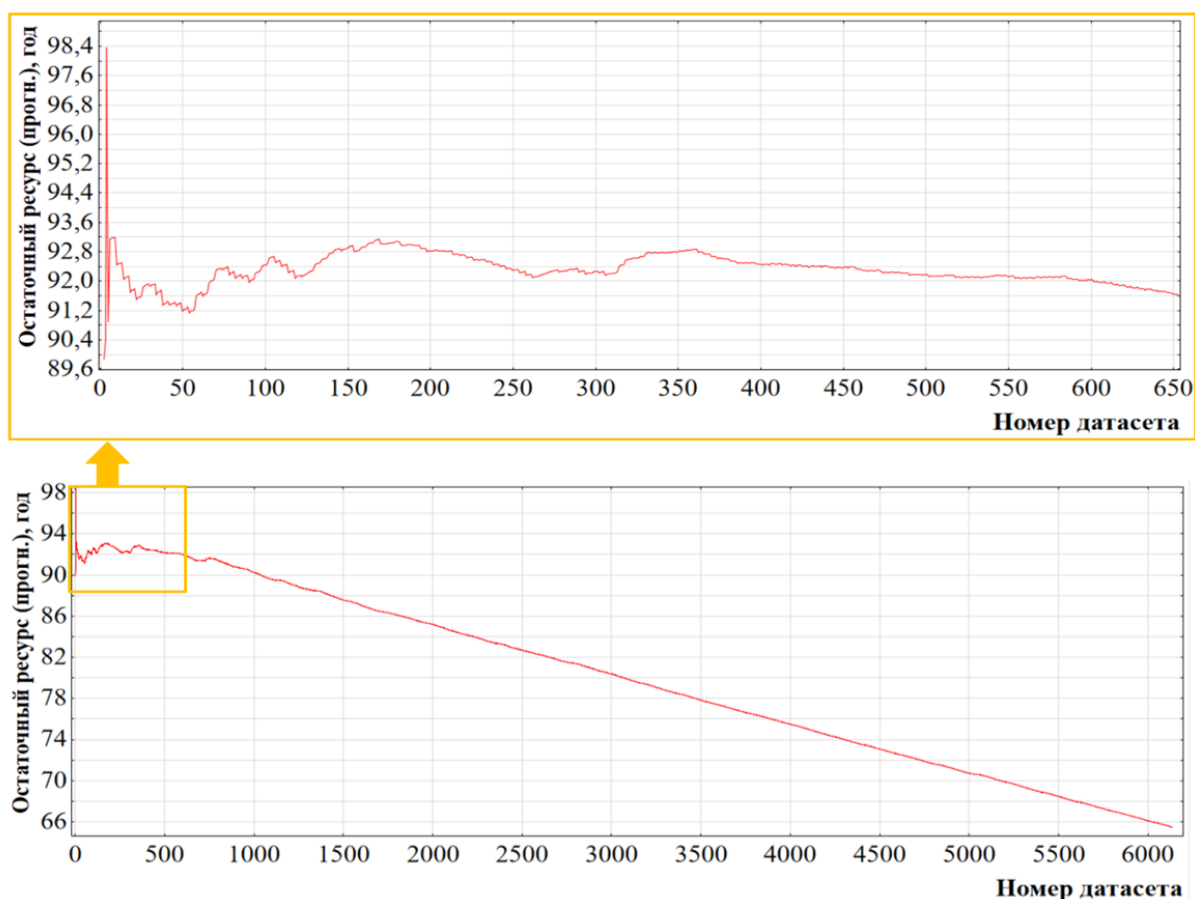


Рисунок 5.1 – График изменения остаточного ресурса здания школы в г. Самара

Исходя из данных, представленных на рисунке 5.1, значения остаточного ресурса рассматриваемых железобетонных конструкций здания школы в г. Самара составляет 65,5 лет.

5.1.2. Оценка экономической эффективности принятия управленческих решений

Для оценки экономической эффективности принятия управленческих решений было рассмотрено, как срок службы изгибаемого элемента будет меняться в зависимости от конструктивных особенностей сечения на примере ранее рассмотренного в главе 3 ригеля Р1. Сечение конструкции было запроектировано под планируемую нагрузку с учетом необходимых конструктивных требований. Тем не менее, варьируя параметрами элемента, можно управлять его жизненным циклом, с целью повышения срока безопасной эксплуатации.

По методике в главе 3 было рассчитано, что, исходя из полученного усредненного значения влажностных условий 53 %, срок службы конструкции составит 91 год (см. рисунок 3.25). Уровню $0,69R_{bn}$ соответствует несущая способность элемента 208,874 кНм. Внесем изменения в сечение, увеличим процент армирования, вместо 2 стержней $\text{Ø}32\text{A}400$ ($A_{st} = 16,08 \text{ см}^2$) принимаем 3 стержня $\text{Ø}28\text{A}400$ ($A_{st} = 18,47$). Новое значение несущей способности M_u при $0,69R_{bn}$ в таком случае составит 228,069 кНм, но, с учетом того, что предыдущее значение 208,874 кНм соответствует тем характеристикам сечения, которые были запроектированы необходимыми и достаточными для рассчитанной нагрузки, при увеличении несущей способности для определения нового прогнозируемого срока службы конструкции при прочих равных условиях ориентируемся на первоначальное значение M_u при $0,69R_{bn}$. Исходя из скорректированного сечения можно построить новую диаграмму, из которой следует, что новый срок службы составит 111 лет (рисунок 5.2).

В таблице 5.1 представлены результаты расчета сроков службы ригеля Р1 с учетом варьирования параметрами сечения. В таблице 5.2 представлено то же для ригеля Р2. Помимо увеличения площади растянутой арматуры, в таблицах 5.1 и 5.2 представлены результаты расчета нового прогнозируемого срока службы, исходя из повышения класса растянутой арматуры, повышения класса бетона на

один класс (вариант 1) и на два класса (вариант 2), увеличения ширины сечения, увеличения площади сжатой арматуры.

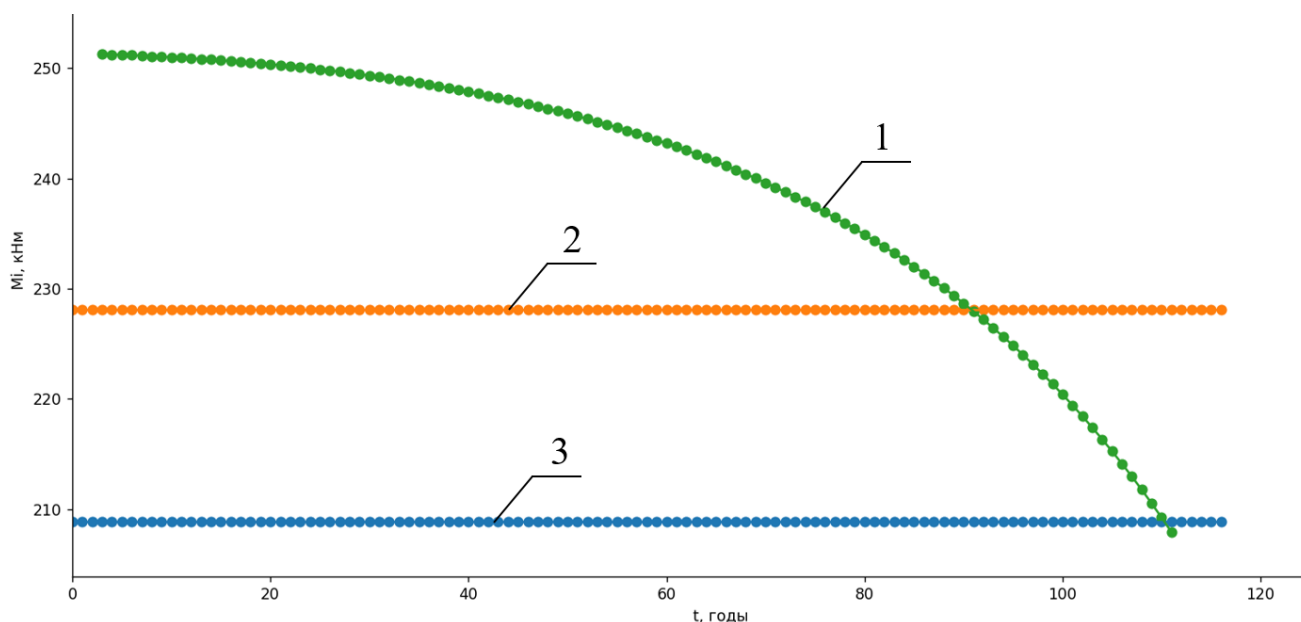


Рисунок 5.2 – Несущая способность ригеля Р1 с учетом увеличения содержания растянутой арматуры: 1 – изменение несущей способности ригеля во времени при усредненной относительной влажности $\varphi = 53\%$ с учетом увеличения содержания растянутой арматуры; 2 – прямая, соответствующая несущей способности M_u при $0,69R_{bn}$ с учетом увеличения содержания растянутой арматуры; 3 – прямая, соответствующая несущей способности M_u при $0,69R_{bn}$ без изменений в сечении

Таблица 5.1 – Управление сроком службы несущего ригеля Р1 с помощью корректировок параметров сечения при проектировании

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

Таблица 5.2 – Управление сроком службы несущего ригеля Р2 с помощью корректировок параметров сечения при проектировании

Изменяемый параметр	Первоначальное значение параметра	Новое значение параметра	Новый прогнозируемый срок службы конструкции, лет	Относительное отклонение от первоначального прогноза (93 года), %
Увеличение площади растянутой арматуры, см ²	24,63	-	-	-
Увеличение площади сжатой арматуры, см ²	1,57	2,26	93	0
Увеличение класса растянутой арматуры	A400	A500	94	+1,1
Увеличение класса бетона (вариант 1)	B30	B35	106	+14,0
Увеличение класса бетона (вариант 2)	B30	B40	119	+28,0
Увеличение ширины поперечного сечения, см	20	25	114	+22,6

На основании результатов, полученных в таблицах 5.1, 5.2 можно сделать вывод о том, что, варьируя параметрами сечения железобетонного элемента можно продлить срок его службы на 9–30 %. Тем не менее, следует учитывать конструктивные особенности конструкции и характер ее работы под нагрузкой. В частности, для ригеля Р2 увеличение площади сжатой арматуры или увеличение класса растянутой арматуры не дало существенного увеличения срока службы, в связи с тем, что по содержанию арматуры сечение близко к состоянию перearмирования. Содержание растянутой арматуры в сечении $\mu = 2,7$ %, в связи с чем, в том числе, для данного ригеля не рассчитывалось дальнейшее увеличение содержания растянутой арматуры. Тем не менее, учитывая особенности работы конструкций под нагрузкой, с помощью разработанной методики можно управлять сроком службы конструкций на стадии проектирования.

Варьирование параметрами сечения ригелей в таблицах 5.1, 5.2 производилось, по рассчитанному ранее усредненному значению относительной влажности $\varphi = 53$ %. Безусловно, варьируя параметрами влажности, можно также увеличить срок службы несущих конструкций, а, следовательно, самого объекта

капитального строительства. Благодаря мониторингу влажностных условий эксплуатации несущих железобетонных конструкций, также можно управлять жизненным циклом здания. При проведении регулярного мониторинга влажностных условий эксплуатации несущих железобетонных конструкций каркаса можно рассчитать по разработанной методике с помощью обученной модели искусственной нейронной сети прогнозируемые сроки службы конструкции и при рекомендациях об изменении влажностного режима помещений – повысить сроки службы.

Рассмотрено, как срок службы изгибаемого элемента меняется при изменении влажностного режима эксплуатации. Предусмотрим в качестве исходных данных изменение влажностного режима эксплуатации с шагом в 10 лет. На момент эксплуатации 30 лет, владея информацией о влажностных условиях за предыдущий период, проанализируем, каким будет срок службы объекта. Для того, чтобы при изменении значения относительной влажности, учесть влажностные условия эксплуатации предыдущего периода, необходимо рассчитать усредненное значение. Значения относительной влажности помещения и усредненные значения на каждый период представлены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Прогнозируемый срок службы ригеля P1 на момент эксплуатации 30 лет, определенный исходя из влажностных условий предыдущего периода эксплуатации

Срок эксплуатации, годы	Относительная влажность в помещении при обследовании φ , %	Усредненное значение относительной влажности за предыдущий период $\varphi_{current}$, %	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

Если при дальнейшей эксплуатации до конца жизненного цикла объекта капитального строительства влажностные условия не изменятся, то срок службы объекта по сравнению с начальным этапом снизится на 9,57 % (таблица 5.4).

Таблица 5.4 – Прогнозируемый срок службы ригеля Р1 при условии неизменной влажности $\varphi = 30\%$ на дальнейший период эксплуатации

Срок эксплуатации, годы	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

Однако, при соблюдении рекомендаций по улучшению влажностных условий эксплуатации до $\varphi = 50-55\%$, срок службы снова возможно продлить, что показано в таблице 5.5.

В таблице 5.5 представлено, что по сравнению с изначально заданной характеристикой прогнозируемого срока службы 94 года при неизменной относительной влажности $\varphi = 60\%$, даже с учетом улучшения влажностных условий эксплуатации, срок службы снижен на 4,3 %. Однако, по сравнению с прогнозом при дальнейшей неизменной относительной влажности $\varphi = 30\%$, прогнозируемый срок службы увеличился на 5,88 %. При поддержании значения относительной влажности 55 % в течение дальнейшего после обследования периода усредненное значение относительной влажности составляло бы 52,2 %. Если предположить, что усредненное значение относительной влажности на объекте было 30 %, то можно повысить срок службы изгибаемого элемента до 91 года, то есть на 9,6 % по сравнению со сроком 83 лет при усредненном значении влажности 30 %. Если в течение всего срока эксплуатации поддерживается усредненное значение относительной влажности 55 %, то увеличение срока жизненного цикла объекта строительства, по сравнению со сроком 83 года при усредненном значении влажности 30 %, составит 10,8 %.

Таблица 5.5 – Прогнозируемый срок службы ригеля Р1 с учетом рекомендаций по улучшению влажностных условий до $\varphi = 50-55\%$ на дальнейший период эксплуатации

Срок эксплуатации, годы	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	-

На рисунке 5.3 (поз. 2) показано изменение несущей способности ригеля во времени при изменении относительной влажности на основании сроков эксплуатации и усредненных значений относительной влажности $\varphi_{current}$ таблицы 5.4. На рисунке 5.3 (поз. 1, 3) показано изменение несущей способности ригеля при неизменном значении относительной влажности – 60 и 30 %, соответственно. На рисунке 5.4 показано то же, только с учетом применения рекомендаций по повышению влажностного режима эксплуатации в соответствии со значениями таблицы 5.5.

Рекомендации по улучшению влажностных условий, безусловно, ограничены требованиями к комфортному пребыванию людей в здании, поэтому, несмотря на возможность рассчитать по разработанной методике значения относительной влажности выше 60 %, в рекомендации для поддержания влажностного режима эксплуатации подобное решение входить не может, тем более, что чрезмерная сырость в помещениях, не предназначенных для мокрых процессов, в течение длительного периода может негативно сказываться на конструкциях [158-161].

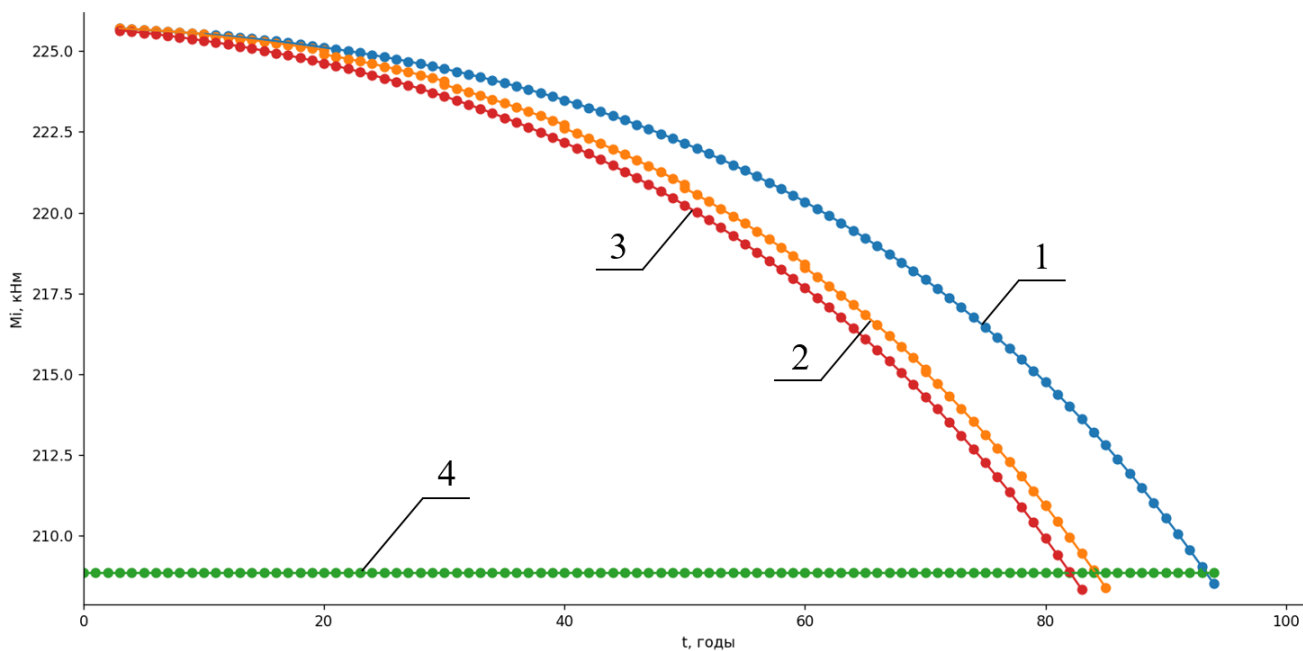


Рисунок 5.3 – Несущая способность ригеля P1 в зависимости от времени действия нагрузки и влажностных условий эксплуатации: 1 – при эксплуатации при относительной влажности 60 %; 2 – при эксплуатации в соответствии с влажностными условиями (таблица 5.4); 3 – при эксплуатации при относительной влажности 30 %; 4 – прямая, соответствующая несущей способности M_u при $0,69R_{bn}$

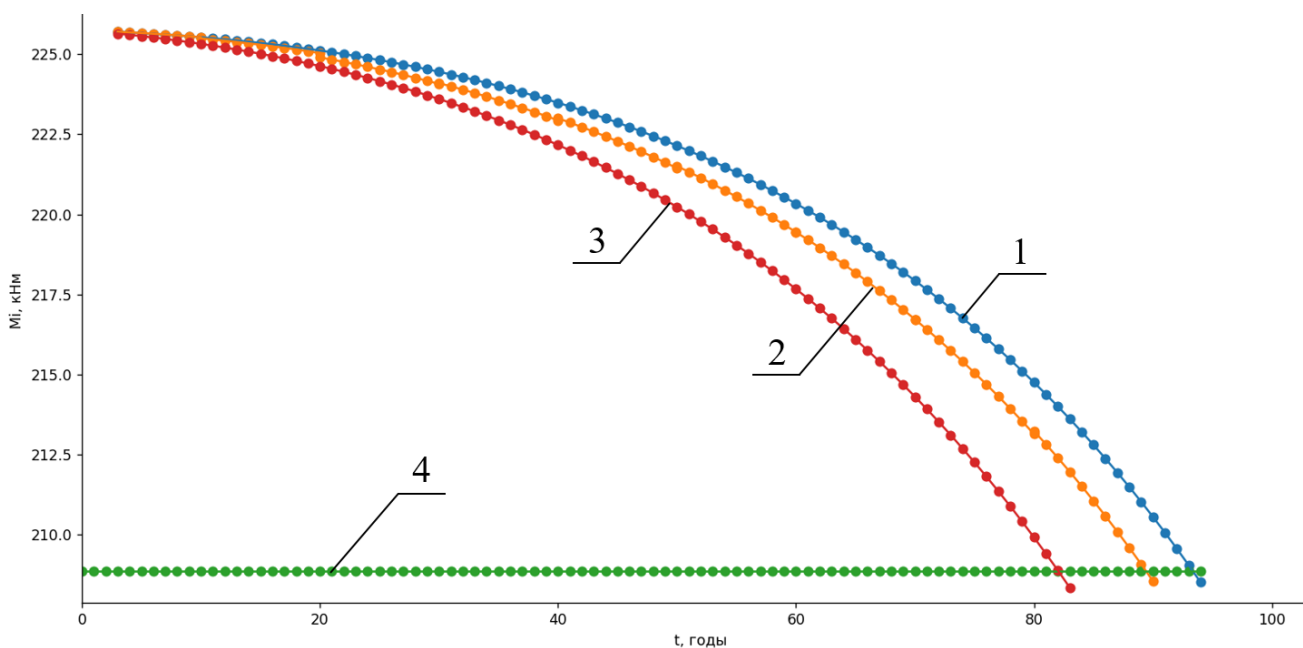


Рисунок 5.4 – Несущая способность ригеля P1 в зависимости от времени действия нагрузки и влажностных условий эксплуатации: 1 – при эксплуатации при относительной влажности 60%; 2 – при эксплуатации в соответствии с рекомендациями (таблица 5.5); 3 – при эксплуатации при относительной влажности 30 %; 4 – прямая, соответствующая несущей способности M_u при $0,69R_{bn}$

Тем не менее наступление благоприятных условий (для конструкций) в помещении возможно на кратковременные периоды текущих ремонтов или в более долгосрочные периоды – при капитальных ремонтах, когда в связи с работами, связанными с покраской, оштукатуриванием и иных влажность естественным образом повышается. Данные периоды повышения влажности на кратковременный период способствуют снижению скорости увеличения деформаций в железобетонных конструкциях и оказывают влияние на срок эксплуатации.

Шаг для мониторинга влажностных условий эксплуатации в 10 лет был в таблицах 5.3-5.5 показан условно для демонстрации механизма работы с методикой управления жизненным циклом объекта капитального строительства посредством мониторинга влажностных условий. Для более точного анализа изменения влажностных условий эксплуатации во времени рекомендуется проводить мониторинг 2-4 раз в месяц с учетом сезонных изменений условий относительной влажности, а также с учетом изменения относительной влажности при проведении отопительного сезона, текущих и капитальных ремонтов, что было представлено в датасете для обучения и дальнейшей апробации работы искусственной нейронной сети. С учетом необходимости обработки большого массива данных, требуется применение искусственной нейронной сети.

Сбор данных о влажностных условиях эксплуатации возможен к осуществлению в рамках работы с информационной моделью здания [162] на этапе эксплуатации, хранение информации о которой предполагается и проходит апробацию на базе государственной информационной системы обеспечения градостроительной деятельности Российской Федерации (ГИСОГД РФ).

С 1 декабря 2020 г. вступили в силу положения статьи 57.6 Градостроительного кодекса Российской Федерации, определяющие понятие и область применения классификатора строительной информации, а также компетенцию Министра России и подведомственного ему учреждения Федеральный центр нормирования, стандартизации и технической оценки соответствия в строительстве (ФАУ «ФЦС») на осуществление деятельности по его формированию и ведению с использованием

ГИСОГД РФ. Классификатор строительной информации имеет статус подсистемы ГИСОГД РФ [163].

Формирование классификатора строительной информации, согласно п. 2 Правил формирования и ведения классификатора строительной информации, утвержденных постановлением Правительства Российской Федерации от 12 сентября 2020 г. № 1416, осуществлено посредством его создания в ГИСОГД РФ в соответствии со структурой и составом классификатора строительной информации, утвержденными приказом Минстроя России от 6 августа 2020 г. № 430/пр, и с учетом апробированных результатов научного исследования [163].

Классификатор строительной информации согласно определению Градостроительного кодекса Российской Федерации [164] – это информационный ресурс, распределяющий информацию об объектах капитального строительства и ассоциированную с ними информацию в соответствии с ее классификацией (классами, группами, видами и другими признаками). Использование классификатора строительной информации является обязательным для формирования и ведения информационной модели в случаях, когда информационная модель требуется. Правила формирования и ведения классификатора строительной информации утверждены Постановлением Правительства РФ от 12 сентября 2020 г. 1416 [165]. Правила формирования и ведения информационной модели объекта капитального строительства утверждены Постановлением Правительства РФ от 15 сентября 2020 г. 1431 [166]. Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства утверждена структура и состав классификатора строительной информации [167].

В области технологий, с помощью которых можно автоматизированно собирать информацию о влажности в помещениях и поддерживать нужное значение, многое разработано и продолжает разрабатываться и совершенствоваться [168, 169]. В работе [170] представлены результаты успешного применения оборудования, в котором с помощью датчиков считывается

информация о температурно-влажностных параметрах микроклимата помещения на примере учебной аудитории центра НОЦ «Системы».

Важным аспектом, применительно к эксплуатации гражданского здания, является вопрос принятия решения о завершении его жизненного цикла. Независимо от того, возможно ли применение мер по продлению срока жизненного цикла объекта строительства и будет ли принято решение об их применении, информация об остаточном ресурсе объекта капитального строительства, полученном на основании разработанной методики, позволяет заблаговременно начать подготовку к стадии ликвидации объекта строительства.

Когда здание признается аварийным и невозможным для дальнейшей эксплуатации, владелец неизбежно сталкивается с проблемой срочного поиска нового объекта, который мог бы исполнять функциональное назначение прежнего объекта. Либо под требуемый функционал приобретается существующее здание, которое, возможно, не в полной мере соответствует необходимым требованиям к планируемым на его базе процессам, а значит требует реконструкции, либо строится новый объект. Вопросы, связанные с поиском подходящего существующего здания, доступного для приобретения, при необходимости реконструкция или, как минимум, ремонт, организационно перенос функциональных процессов на новый объект могут занять несколько лет. То же относится и к новому строительству. Независимо от того, является ли объект государственным или коммерческим, владелец будет неизбежно терпеть убытки от простоя или от недостаточно эффективного выполнения функционального назначения на временно арендованных площадях в этот период. При наличии возможности подготовиться к моменту завершения периода безопасной эксплуатации объекта строительства, а значит – к началу стадии ликвидации, мероприятия, связанные с переносом функционального назначения, можно начать заблаговременно.

Также, важным аспектом заблаговременной подготовки к стадии ликвидации является подготовка к сносу объекта строительства с точки зрения утилизации строительных отходов [171, 172]. Одним из стратегических направлений в России

на текущий момент являются вопросы ресурсосбережения, в том числе рециклинг – повторное применение отходов. Что касается строительства, то объемы строительных отходов, как на стадии строительства и реконструкции, так и при сносе объекта высоки [173, 174]. Утилизацию сооружения, как стадию жизненного цикла необходимо рассматривать на этапе планирования и проектирования [175]. Она должна осуществляться методами, обеспечивающими минимальное воздействие на окружающую среду и человека [175]. На сегодняшний день в нашей стране уже успешно работает и развивается ряд компаний, занимающихся переработкой отходов строительства [176]. Отрасль продолжает развиваться. Проведены [177-179] и продолжают проводиться исследования, связанные с использованием отходов строительного производства в составе производимых материалов и изделий для применения в новых зданиях.

В таблице 5.6 показана эффективность применения разработанного механизма принятия управленческих решений.

Таблица 5.6 – 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

Расчет экономической эффективности управления сроком службы жизненным циклом объекта строительства основывается на расценках на 01.01.2025 г., представленных в документе «Укрупненные нормативы цены строительства. НСЦ 81-02-03-2025. Сборник №03. Объекты образования», утвержденном Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации №194/пр от 31 марта 2025 г. «Об утверждении укрупненных нормативов цены строительства» [180].

Стоимость строительства школы со сборным железобетонным каркасом и стеновыми железобетонными панелями с отделкой фасада декоративной штукатуркой с учетом этапов инженерных изысканий и архитектурно-строительного проектирования составляет 1 275 514,61 тыс. руб. Цены в сборнике представлены для Московской обл., для пересчета на расценки других регионов следует использовать коэффициент перехода от цен базового района к уровню цен субъектов Российской Федерации ($K_{пер.}$). Для Самарской области $K_{пер.} = 0,87$.

Стоимость строительства школы в Самарской области с учетом этапов инженерных изысканий и архитектурно-строительного проектирования составит 1 109 697,71 тыс. руб.

На рисунке 1.2 представлено соотношение стоимости затрат на разных этапах жизненного цикла объекта строительства. Для этапов инженерных изысканий, архитектурно-строительного проектирования и строительства суммарно процент затрат от стоимости жизненного цикла объекта строительства составит 21 %. Затраты этапа эксплуатации от стоимости жизненного цикла объекта строительства составляют 75 %. Стоимость эксплуатации объекта строительства в таком случае составит 3 963 206,25 тыс. руб.

В таблице 5.7 представлена исходная информация для оценки экономической эффективности управления жизненным циклом объекта капитального строительства с помощью разработанной методики.

Таблица 5.7 – Исходная информация для оценки экономической эффективности управления жизненным циклом здания школы в г. Самара с помощью разработанной методики

Наименование	Ед. изм.	Показатель	Примечания
Объект	-	Школа	
Конструктивное исполнение	-	Сборный железобетонный каркас и стеновые железобетонные панели с отделкой фасада декоративной штукатуркой	
Общая площадь здания	м ²	20 548	
Затраты на прединвестиционной стадии	тыс. руб.	26 421,375	менее 1 % от стоимости жизненного цикла объекта строительства
Затраты на этапах инженерных изысканий, архитектурно-строительного проектирования и строительства	тыс. руб.	1 109 697,71	21 % от стоимости жизненного цикла объекта строительства
Затраты на стадии эксплуатации (86 лет)	тыс. руб.	3 963 206,25	75 % от стоимости жизненного цикла объекта строительства
Затраты на стадии ликвидации	тыс. руб.	211 371,00	менее 4 % от стоимости жизненного цикла объекта строительства
Стоимость жизненного цикла объекта строительства	тыс. руб.	5 310 696,335	

При усредненном значении относительной влажности 40 % продолжительность жизненного цикла здания составит 86 лет. На основании критериального подхода, применим ранее разработанный инструментарий управления жизненным циклом объекта строительства на этапе проектирования. Предусмотрим контроль относительной влажности воздуха и поддержание ее на уровне 55 % (срок службы повысится с 86 до 92 лет), а также предусмотрим повышение класса бетона ригелей каркаса с *B30* до *B35* (срок службы повысится с 92 до 111 лет). Увеличение стоимости бетона относительно стоимости жизненного цикла незначительно, но также учтено в стоимости жизненного цикла объекта строительства, с учетом того, что требуемый объем бетона для изготовления ригелей – 190,32 м³. Расценки взяты на основании цен

производителя ООО «Самарский бетон» в г. Самара [181]. В таблице 5.8 представлены результаты расчета экономической эффективности применения разработанного механизма принятия управленческих решений для здания школы в г. Самара.

Таблица 5.8 – Экономическая эффективность применения разработанного механизма принятия управленческих решений для здания школы в г. Самара

Наименование	Ед. изм.	Показатель
Вариант 1		
Стоимость эксплуатации здания с учетом прогнозируемого срока службы 86 лет без учета внесения изменений	тыс. руб.	3 963 206,25
Стоимость строительства нового здания в течение 3 лет с учетом затрат на последующую эксплуатацию в течение 22 лет	тыс. руб.	2 123 541,09
Вариант 2		
Стоимость эксплуатации здания с учетом увеличения срока службы до 111 лет	тыс. руб.	5 115 300,69
Вариант 1		
Стоимость жизненного цикла здания в течение 86 лет и нового здания в течение 25 лет без учета изменений	тыс. руб.	7 460 658,80
Вариант 2		
Стоимость жизненного цикла здания с учетом увеличения срока службы и дополнительных затрат на реализацию управленческих решений	тыс. руб.	6 463 076,26
Экономическая целесообразность (экономия)	тыс. руб.	997 582,55
	%	13,38

Исходя из полученных в таблице 5.8 результатов, можно сделать вывод о том, что разработана методика для управления жизненным циклом гражданских зданий с железобетонным каркасом с учетом влажностных условий их эксплуатации с обученной искусственной нейронной сетью, на основании которой, для здания школы в г. Самара экономическая целесообразность (экономия) составила 13,38 %.

5.2. Апробация результатов исследований

Апробация результатов исследований осуществлялась в производственных условиях на предприятии ООО «Центрогипроруда» (Белгород) при разработке

проекта реконструкции административно-бытового корпуса Михайловского ГОКа им. А. В. Варичева в г. Железногорск (Курская обл.) в виде дополнительной расчетной методики для прогнозирования нового срока службы указанного объекта капитального строительства; на предприятии ООО «ЭКОМИР ЖБК-1» (Белгород) при проведении мониторинга технического состояния эксплуатируемых зданий на ул. Виктора Лосева в г. Белгород с разработкой рекомендаций по проведению мероприятий, обеспечивающих повышение срока службы железобетонных конструкций.

Имеются акты о внедрении результатов диссертационной работы следующих предприятий:

– ООО «Центрогипроруда» (Белгород) по прогнозированию нового срока службы объекта капитального строительства в виде дополнительной расчетной методики (Приложение Д);

– ООО «ЭКОМИР ЖБК-1» (Белгород) по использованию механизма принятия управленческих решений для гражданских зданий с учетом влажностных условий помещений на этапе эксплуатации (Приложение Е).

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

На рисунке 5.5 представлена дизайн-схема управления жизненным циклом гражданских зданий на основе нейросетевого прогнозирования. Схема содержит несколько взаимосвязанных блоков, организованных в иерархическую структуру.

Системообразующим элементом схемы является головной блок, формулирующий управление жизненным циклом гражданского здания на этапе проектирования и эксплуатации на основе модели искусственной нейронной сети. Данный блок задает стратегическое направление всей последующей декомпозиции задач и определяет область применения разрабатываемого инструментария.

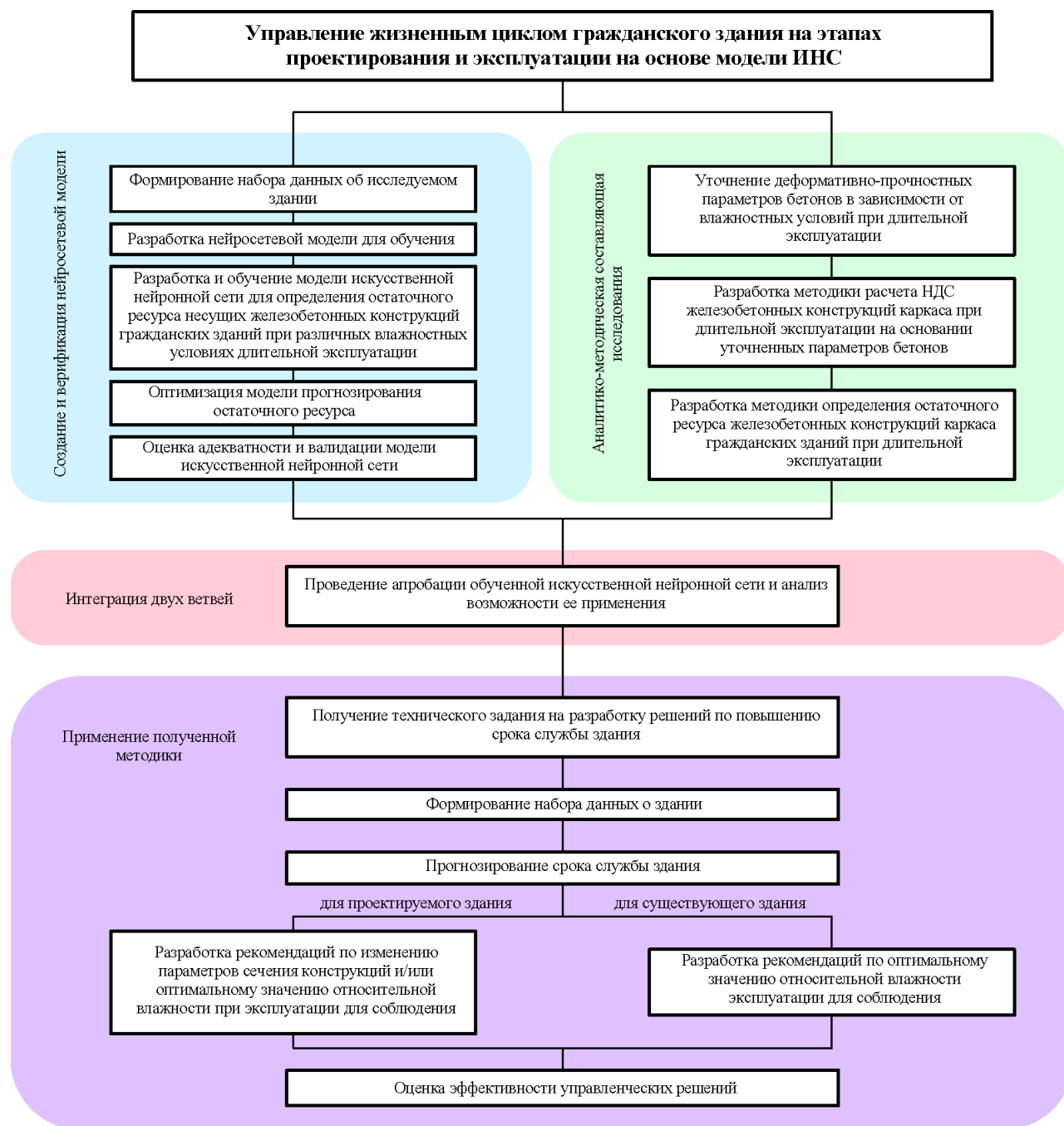


Рисунок 5.5 – Дизайн-схема управления жизненным циклом гражданского здания нейросетевым прогнозированием остаточного ресурса несущих конструкций

Левая ветвь схемы описывает последовательность этапов создания и верификации нейросетевой модели прогнозирования остаточного ресурса несущих конструкций гражданского здания с железобетонным каркасом с учетом влажностных условий их эксплуатации. Процесс инициируется формированием набора данных об исследуемом здании, что составляет эмпирическую базу для обучения модели. Далее осуществляется разработка и обучение модели

искусственной нейронной сети для определения деформативно-прочностных свойств бетона несущих железобетонных конструкций длительно эксплуатируемых гражданских зданий при различных влажностных условиях. Последующий этап предусматривает оптимизацию модели прогнозирования деформативно-прочностных свойств бетона, за которым следует оценка адекватности и валидация модели искусственной нейронной сети.

Правая ветвь схемы раскрывает аналитико-методическую составляющую исследования. Она включает в себя уточнение деформативно-прочностных параметров центрального и неоднородного сжатия и растяжения бетона в зависимости от влажностных условий эксплуатации, разработку методики расчета параметров НДС изгибаемых и внецентренно сжатых железобетонных конструкций на основании уточненных параметров бетона и переход непосредственно к расчету срока службы несущих конструкций.

Оба контура объединяются в интеграционном блоке, предусматривающем апробацию обученной искусственной нейронной сети и проведение анализа возможности ее применения в практике проектирования. Далее схема переходит к прикладной фазе, включающей последовательность операционных процедур: формирование набора данных о проектируемом здании, прогнозирование срока службы объекта капитального строительства исходя из влажностных условий эксплуатации и параметров НДС конструкций, разработку рекомендаций и, наконец, оценку эффективности управленческих решений с помощью критериального подхода.

Таким образом, дизайн-схема представляет собой иерархически организованную модель принятия решений, в которой процесс управления жизненным циклом объекта декомпозирован на три функциональных страта: научно-исследовательский – формирование предиктивной нейросетевой модели и расчетно-методического аппарата; верификационный – апробация и оценка

адекватности разработанного инструментария; прикладной – реализация прогнозных процедур и выработка управленческих рекомендаций на основе критериальной оценки.

Взаимосвязь блоков обеспечивается посредством направленных связей, отражающих логическую последовательность и информационную зависимость этапов, что позволяет рассматривать данную схему как алгоритмическую основу интеллектуальной системы поддержки принятия решений при управлении жизненным циклом объектов капитального строительства.

Графическая интерпретация механизма управления жизненным циклом гражданских зданий с железобетонным каркасом с учетом влажностных условий их эксплуатации в Приложении И.

5.3. Выводы по пятой главе

1. Разработан механизм принятия управленческих решений на этапе проектирования объекта капитального строительства, обеспечивающий возможность повышения сроков службы как проектируемых гражданских зданий с несущим железобетонным каркасом, так и уже существующих объектов на основании влажностных условий их эксплуатации.

2. Обоснована экономическая эффективность (экономия) предлагаемого подхода к управлению жизненным циклом зданий на этапах проектирования и эксплуатации. Увеличение жизненного цикла гражданских зданий со сборным железобетонным каркасом при управлении сроком службы несущих конструкций, исходя из влажностных условий на стадии эксплуатации возможно до 10 %, на стадии проектирования – до 11 %, при управлении сроком службы несущих конструкций, исходя из характеристик их сечений на стадии проектирования – до 30 %.

3. Как на стадии проектирования, так и на стадии эксплуатации применение разработанной методики позволяет начать заблаговременную подготовку к

началу стадии ликвидации объекта строительства, до момента исчерпания остаточного ресурса объекта строительства.

4. Результаты исследований апробированы в производственных условиях на предприятии ООО «ЦЕНТРОГИПРОРУДА» на стадии проектирования и ООО «ЭКОМИР ЖБК-1» на стадии эксплуатации.

5. Разработана дизайн-схема управления жизненным циклом гражданских зданий нейросетевым прогнозированием остаточного ресурса их несущих конструкций каркаса, а также представлена графическая интерпретация механизма управления жизненным циклом гражданских зданий с железобетонным каркасом с учетом влажностных условий.

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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Степанова, В. Ф.** Мониторинг и анализ нормативных документов в области проектирования железобетонных конструкций по их жизненному циклу / В. Ф. Степанова, В. Р. Фаликман, Е. Н. Королева // Строительные материалы. – 2018. – № 7. – С. 14–19. – DOI: 10.31659/0585-430X-2018-761-7-14-19.
2. **Стельмах, С. А.** Современное состояние вопроса управления качеством в строительстве на всех этапах жизненного цикла / С. А. Стельмах, Д. В. Мавзолевский, Е. М. Щербань, Н. А. Доценко, Д. М. Ельшаева // Сборник статей V Всероссийской научно-практической конференции «Образование в России и актуальные вопросы современной науки». – Пенза: Пензенский государственный аграрный университет. – 2022. – С. 416-418.
3. **Опарина, Л. А.** Методика выбора ресурсосберегающих организационно-технологических решений на этапе завершения жизненного цикла зданий / Л. А. Опарина, Е. А. Власова // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2024.– № 10. – С. 72-78. – DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-10-72-78.
4. **Федеральный закон** от 30.12.2009 № 384-ФЗ. «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений». – Собрание законодательства Российской Федерации. – 2010. – № 1. – С. 5.
5. **Журавлев, П. А.** Фактические этапы проектирования в инвестиционно-строительной деятельности / П. А. Журавлев // Промышленное и гражданское строительство. – 2023.– № 4. – С. 55-62. – DOI: 10.33622/0869-7019.2023.04.55-62.
6. **Лосев, К. Ю.** Информационные особенности жизненного цикла зданий и сооружений / К. Ю. Лосев // Вестник Евразийской науки. – 2021. – №1. – Т. 13. – URL: <https://esj.today/PDF/13SAVN121.pdf>.
7. **Шейна, С. Г.** Методы принятия управленческих решений на различных этапах жизненного цикла зданий / С. Г. Шейна, Н. П. Умнякова, Л. В. Гиря, А. Е. Швец // Жилищное строительство. – 2023. – № 6. – С. 3-8. – DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2023-6-3-8>.
8. **Мошкалев, Д. С.** Методы и инструменты управления стоимостью строительства на предпроектном этапе жизненного цикла объекта капитального

строительства / Д. С. Мошкалев, А. Р. Бахтизина // Вестник МГСУ. – 2023. – Т. 18. – Вып. 1. – С. 132–142. – DOI: 10.22227/1997-0935.2023.1.132-142.

9. **Инженерная библиотека** в области промбезопасности [электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://library-full.nadzor-info.ru/doc/37532>.

10. **Никулина, О. М.** Анализ основных проблем инновационного развития ЖКХ региона / О. М. Никулина, Г. З. Акимова // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2017. – № 12. – С. 226-232. – DOI: 10.12737/article_5a27cb931e4879.27049367.

11. **Кочура, И. В.** Научные подходы к выбору методов оценки экономического потенциала угледобывающих предприятий на разных этапах управления их развитием / И. В. Кочура // Вестник Донецкого национального университета. Серия В. Экономика и право. – 2022. – № 3. – С. 112-121.

12. **Рукомеда, В. В.** Научные подходы к пониманию сущности и содержания финансового управления предприятием / В. В. Рукомеда // Сборник научных статей 14-й Международной молодежной научной конференции «Поколение будущего: взгляд молодых ученых-2025». – Курск. – 2025. – С. 271-273.

13. **Кобзева, Е. В.** Инновационные подходы к управлению интеллектуальным капиталом промышленных предприятий / Е. В. Кобзева, М. С. Еременко // Сборник тезисов докладов IX международной научно-технической конференции «Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства». – Алчевск. – 2025. – С. 440-441.

14. **Мильке, И. О.** Инновационные подходы в управлении персоналом на предприятии / И. О. Мильке, А. В. Заступов // Сборник статей XIX Международной научно-практической конференции «Опыт и проблемы реформирования системы менеджмента на современном предприятии: тактика и стратегия». – 2020. – С. 196-199.

15. **Тиньков, И. А.** Инновационные подходы к управлению и моделированию архитектуры предприятия: перспективы развития и эффективные стратегии проектирования / И. А. Тиньков // Сборник материалов VIII Международной научно-практической конференции «Бизнес-инжиниринг сложных систем: модели, технологии, инновации». – Донецк. – 2023. – С. 187-191.

16. **Лакетич, С. К.** Разработка схемы управления жизненным циклом многофункционального высотного здания кинетического типа на стадии эксплуатации / С. К. Лакетич, В. В. Строкова // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2024. – № 2. – С. 33-42. – DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-2-33-42.

17. **Москвина, М. М.** Внутренняя и внешняя среда организации / М. М. Москвина, П. И. Чурсина, А. С. Сухова // Молодой ученый. – 2023. – № 18(465). – С. 118-131.

18. **Валеева, Ю. С.** Реализация системного подхода в управлении качеством на предприятии сферы услуг / Ю. С. Валеева, И. И. Нуртдинов, Е. Ю. Елесин // Экономика и предпринимательство. – 2023. – № 4 (153). – С. 718-726.

19. **Двас, А. Г.** О необходимости совместной реализации процессного и системного подходов при управлении логистическими рисками производственного предприятия / А. Г. Двас // Теория и практика общественного развития. – 2018. – № 2 (120). – С. 31-33.

20. **Заступов, А. В.** Системные подходы в управлении предприятием как имущественным комплексом / А. В. Заступов // Экономика и предпринимательство. – 2024. – № 6 (167). – С. 1327-1330.

21. **Нестеренко, П. С.** Системный подход в стратегическом управлении эффективностью на транспортных предприятиях / П. С. Нестеренко // Актуальные проблемы современного транспорта. – 2024. – № 3 (17). – С. 24-33.

22. **Селютина, Н. В.** Системный подход при управлении энергетическими затратами на металлургическом предприятии / Н. В. Селютина, Е. Г. Кабулова // Научно-технический вестник Поволжья. – 2022. – № 6. – С. 83-85.

23. **Трофимова, М. С.** Обзор методов и методик системного анализа применительно к управлению качеством предприятия / М. С. Трофимова, С. М. Трофимов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2015. – № 14. – С. 74-96.

24. **Официальный сайт** Федеральной службы государственной статистики (Росстат) [электронный ресурс]. – Режим доступа: www.rosstat.gov.ru.

25. **Жилищное хозяйство в России.** 2022: Стат. сб. / Росстат. – М., 2022. – 83 с.
26. **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. Том 1. – Белгород: изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2023. – С. 237-240.
27. **Овчинников, А. Н.** Проблемы существующей системы управления жизненным циклом объектов капитального строительства и факторы, их определяющие / А. Н. Овчинников, А. А. Волков // Наука и бизнес: пути развития. – 2019. – №5 (95). – С. 38-42.
28. **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>.
29. **Фахратов, М. А.** Основные участники создания объекта капитального строительства и подготовки строительного производства / М. А. Фахратов, Р. Р. Аманов, В. М. Фахратов, В. В. Ефимов // Вестник евразийской науки. – 2023. – Т. 15. – № 2. – URL: <https://esj.today/PDF/56SAVN223.pdf>.
30. **Кузина, В. С.** Формирование инженерного мышления студентов колледжа посредством проблемно-ориентированного подхода в обучении электротехническим дисциплинам / В. С. Кузина, В. Н. Некрасова // Сборник статей XII Всероссийской научно-практической конференции «Техническое регулирование в едином экономическом пространстве». – Екатеринбург. – 2025. – С. 116-124.
31. **Рылов, А. Н.** Проблемно-ориентированный подход к формированию тьюторской компетентности будущих педагогов-психологов / А. Н. Рылов // Проблемы современного педагогического образования. – 2024. – № 84-2. – С. 321-324.

32. **Лосев, К. Ю.** Методологические аспекты жизненного цикла зданий / К. Ю. Лосев // Вестник Евразийской науки. – 2019. – № 6. – Т. 11. – URL: <https://esj.today/PDF/119SAVN619.pdf>.

33. **Имамов, М. М.** Процессы управления проектом: инициация / М. М. Имамов // Электронный экономический вестник Татарстана. – 2019. – №3. – С. 46-51.

34. **Воскресенская, О. В.** Управление жизненным циклом проекта на промышленных предприятиях / О. В. Воскресенская // E-SCIO. – 2022. – №9 (72). – С. 391-397.

35. **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.

36. **Римшин, В. И.** Определение факторов, влияющих на жизненный цикл здания торгового назначения / В. И. Римшин, Е. С. Кецко, С. М. Есипов, С. И. Меркулов // Вестник евразийской науки. – 2023. – № 6.– Т. 15. – URL: <https://esj.today/PDF/56SAVN623.pdf>.

37. **Распоряжение Правительства РФ** от 31 октября 2022 г. № 3268-р «О Стратегии развития строительной отрасли и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации на период до 2030 года с прогнозом до 2035 года (с изменениями на 23 октября 2025 года)». – Собрание законодательства Российской Федерации. – 2022. – № 22. – С. 7815.

38. **Сулейманова, Л. А.** Управление жизненным циклом здания на этапе эксплуатации с использованием моделей искусственных нейронных сетей и машинного обучения / Л. А. Сулейманова, А. А. Х. Обайди // Вестник БГТУ им. Шухова. – 2024. – № 3. – С. 38-46. – DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-3-38-46.

39. **Официальный сайт** Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации [электронный ресурс]. – Режим доступа: www.minstroyrf.gov.ru.

40. **Государственная информационная система** единый государственный реестр заключений экспертизы проектной документации объектов капитального строительства [электронный ресурс]. – Режим доступа: www.egrz.ru.

41. **Официальный сайт АО «БАРС Груп»** [электронный ресурс]. – Режим доступа: www.bars.group.

42. **СП 301.1325800.2017.** Информационное моделирование в строительстве. Правила организации работ производственно-техническими отделами. Официальное издание. – М.: Стандартинформ, 2017. – 23 с.

43. **СП 331.1325800.2017.** Информационное моделирование в строительстве. Правила обмена между информационными моделями объектов и моделями, используемыми в программных комплексах. Официальное издание. – М.: Стандартинформ, 2018. – 21 с.

44. **СП 333.1325800.2020.** Информационное моделирование в строительстве. Правила формирования информационной модели объектов на различных стадиях жизненного цикла. Официальное издание. – М.: Стандартинформ, 2021. – 177 с.

45. **СП 328.1325800.2020.** Информационное моделирование в строительстве. Правила описания компонентов информационной модели. Официальное издание. – М.: Стандартинформ, 2021. – 11 с.

46. **Абрамян, С. Г.** Система управления жизненным циклом объектов капитального строительства с использованием цифровых технологий / С. Г. Абрамян, О. В. Бурлаченко, О. В. Оганесян, А. О. Бурлаченко // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2021. – Вып. 4(85). – С. 305-313.

47. **Горбанева, Е. П.** BIM-технологии в сфере строительного производства / Е. П. Горбанева, К. С. Бывальцев // Сборник научных трудов 3-й Международной научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов, магистров и бакалавров «Проектирование и строительство». – Курск: Юго-западный государственный университет. – 2019. – С. 141-145.

48. **Горбанева, Е. П.** Интеграция методов информационного моделирования и моделей энергоэффективности на протяжении жизненного цикла проекта /

Е. П. Горбанева, И. А. Косовцева // Недвижимость: экономика, управление. – 2024. – № 3. – С. 139-142.

49. **Дорохов, Д. С.** Взаимодействие технологий информационного моделирования с возможностями виртуальной и дополненной реальности / Д. С. Дорохов, И. И. Овчинников // Вестник Евразийской науки. – 2022. – Т. 14. – № 3. – URL: <https://esj.today/PDF/52SAVN322.pdf>.

50. **Карасев, И. С.** Разработка предложений к плану мероприятий («дорожной карте») по внедрению BIM-технологий как фактор развития концепции «Умный город» / И. С. Карасев, Л. А. Опарина // Молодые ученые - развитию национальной технологической инициативы (ПОИСК). – 2020. – № 1. – С. 270-273.

51. **Карасев, И. С.** Сокращение сроков проектирования за счет автоматизации типовых задач с использованием BIM / И. С. Карасев, Л. А. Опарина // Молодые ученые - развитию национальной технологической инициативы (ПОИСК). – 2022. – № 1. – С. 430-432.

52. **Лapidус, А. А.** Цифровое информационное моделирование BIM – одна из возможностей управления жизненным циклом объектов строительства / А. А. Лapidус, С. В. Федосов, А. Б. Петрухин, Э. Кеневаи // Строительное производство.– 2023.– № 4 (48).– С. 32-36.

53. **Мищенко, В. Я.** Информационное моделирование процессов энергосбережения в области проектирования, строительства и эксплуатации / В. Я. Мищенко, Е. П. Горбанева, И. А. Косовцева // Научный журнал строительства и архитектуры. – № 1 (69). – 2023. – С. 80-92.

54. **Сташевская, Н. А.** Развитие технологий информационного моделирования в России / Н. А. Сташевская, Ф. Д. Орлов, Д. Р. Крахин, Р. С. Палкин // Инженерный вестник Дона. – 2024. – № 11 (119). – С. 1-21.

55. **Стельмах, С. А.** Обзор и анализ мирового опыта и проблематики информационного моделирования на этапе проектирования / С. А. Стельмах, М. А. Альков, Т. О. Кондратенко, А. Д. Тютина, М. П. Котенко // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2023. – № 3 (51). – С. 28-44.

56. **Сулейманова, Л. А.** Совместное моделирование ограждающих конструкций зданий / Л. А. Сулейманова, И. С. Рябчевский, Н. А. Атапина // Университетская наука. – 2021. – №1 (11). – С. 77-79.

57. **Чельшков, П. Д.** Цифровая система управления жизненным циклом объектов капитального строительства / П. Д. Чельшков, А. А. Волков, А. Е. Давыдов // Промышленное и гражданское строительство. – 2023. – № 2. – С. 10-19. – DOI: 10.33622/0869-7019.2023.02.10-19.

58. **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>.

59. **Галкина, Т. Э.** Критериальный комплекс оценки результативности реализации персонифицированного подхода в системе дополнительного социального профессионального образования / Т. Э. Галкина, С. Н. Вольхин // Человеческий капитал. – 2012. – № 5 (41). – С. 107-110.

60. **Курихина, Т. И.** Критериальный подход к формированию творческой активности дошкольников в условиях детской театральной студии / Т. И. Курихина // Материалы межвузовской научно-практической конференции «Современная индустрия досуга: векторы модернизации». – 2019. – С. 188-192.

61. **Махмуд, Д.** Подходы к критериальному оцениванию рабочих программ учебных курсов в вузе / Д. Махмуд // Преподаватель XXI век. – 2025. – № 1. – Ч. 1. – С. 54-63. – DOI: 10.31862/2073-9613-2025-1-54-63.

62. **Пряничникова, Я. Д.** Критериальный подход к оценке качества образования / Я. Д. Пряничникова // Вестник по педагогике и психологии Южной Сибири. – 2017. – № 1 – С. 83-92.

63. **Шабанова, И. А.** Критериальный подход к оценке качества выполнения ситуационных задач / И. А. Шабанова, С. В. Ковалева // Научно-педагогическое обозрение. – 2018. – № 2 (20). – С. 131-138.

64. **Абалакин, А. А.** Основные критериальные подходы к управлению портфелем продукции компании / А. А. Абалакин, А. А. Груднева // Сборник

материалов XVII Международного научного конгресса «Роль бизнеса в трансформации общества - 2022». – М. – 2022. – С. 292-296.

65. **Васин, Н. С.** Оценка степени информативности экономических показателей как критериев устойчивости развития и функционирования предприятия / Н. С. Васин, В. В. Чистяков // Финансовая аналитика: проблемы и решения. – 2014. – № 47 (233). – С. 42-50.

66. **Моисеев, С. И.** Модели использования критериального подхода для оценки эффективности труда / С. И. Моисеев, Е. В. Карпова // Управление строительством. – 2018. – № 1 (10). – С. 56-64.

67. **Пушкин, В. А.** О критериальном подходе к оценке закупочной деятельности муниципальных образований (на примере осуществления закупок на разработку схем энергоснабжения) / В. А. Пушкин, О. В. Рожков, С. А. Юрьев // Экономика и предпринимательство. – 2017. – № 1 (78). – С. 1130-1135.

68. **Лысенко, В. Г.** Критериальная оценка эффективности опережающей профессиональной подготовки кадров в регионе / В. Г. Лысенко // Профессиональное образование в России и за рубежом. – 2024. – № 2 (54). – С. 50-58.

69. **Полянская, Э. В.** Критериальные подходы по определению стратегических направлений и управлению развитием региона (на примере Астраханской области) / Э. В. Полянская // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2017. – № 4 (40). – С. 190-194.

70. **Мелехин, В. Б.** Критерии выбора конкурентоспособных строительных проектов на заданном сегменте рынка / В. Б. Мелехин, М. А. Нурмагомедов // Экономика строительства. – 2018. – № 5 (53). – С. 35-43.

71. **Никулина, Ю. А.** The Research of the factors of the Russian building complex innovation development / Ю. А. Никулина, А. С. Немцева // Сборник трудов IX Международного молодежного форума «Образование. Наука. Производство». – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2017. – С. 2772-2775.

72. **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. Хадонова. – Владикавказ: Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет). – 2026.– С. 107-112.

73. **Казанцев, В. Э.** Оценка возможности сдачи в эксплуатацию здания незавершенного строительства и повышения его этажности / В. Э. Казанцев, Э. З. Бжания // Сборник научных статей 9-й международной молодежной научной конференции «Юность и знания – гарантия успеха – 2022». – Курск. – 2022. – Т. 2. – С. 342-344.

74. **Сербина, Е. А.** Цифровизация процессов организации строительства незавершенных объектов капитального строительства / Е. А. Сербина, О. В. Литвинова // Молодежный вестник ИрГТУ. – 2025. – Т. 15. – № 4. – С. 565-571.

75. **Че, В. О.** Маркетинговое исследование рынка жилищного строительства на примере сегмента незавершенного строительства / В. О. Че // Материалы международной научно-практической конференции «Современные проблемы экономического развития предприятий, отраслей, комплексов, территорий». – 2015. – С. 170-173.

76. **Гринфельд, Г. И.** Влажностное состояние современных конструкций из автоклавного газобетона в условиях эксплуатации / Г. И. Гринфельд, С. А. Морозов, И. А. Согомонян, П. С. Зырянов // Инженерно-строительный журнал. – 2011. – № 2 (20). – С. 33-38.

77. **Петров, А. С.** Влияние температурно-влажностных условий эксплуатации строительных материалов на их паропроницаемость / А. С. Петров, В. Н. Куприянов // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2015. – № 1 (31). – С. 92-98.

78. **Петров, А. С.** Переменное значение паропроницаемости материалов в условиях эксплуатации и его влияние на прогнозирование влажностного состояния ограждающих конструкций / А. С. Петров, В. Н. Куприянов // Academia. Архитектура и строительство. – 2016. – № 2. – С. 97-105.

79. **Пономаренко, Л. В.** Натурное исследование прочности склеивания массивной древесины современными клеями при эксплуатации в различных

условиях / Л. В. Пономаренко, Е. В. Кантиева, М. А. Послухаев, А. Н. Чернышев // Лесотехнический журнал. – 2020. – Т.10. – № 1 (37). – С. 105-115.

80. **Федосов, С. В.** Причины снижения работоспособности деревянных конструкций при эксплуатации в среде с циклически изменяющимися температурно-влажностными условиями / С. В. Федосов, В. Г. Котлов, М. А. Иванова // Жилищное строительство. – 2017. – № 12. – С. 20-25.

81. **Береговой, А. М.** Выбор конструкций наружных ограждений с учетом энергосбережения в условиях неблагоприятных воздействий окружающей среды / А. М. Береговой, В. А. Береговой // Региональная архитектура и строительство. – 2019. – № 1 (38). – С. 86-90.

82. **Гасанов, К. А.** Совершенствование условий эксплуатации наружных несущих стен / К. А. Гасанов, А. М. Джабраилова, М. М. Байсултанов, А. Д. Мусаев // Сборник научных трудов конференции «Современные строительные технологии и материалы». – Махачкала. – 2024. – С. 37-42.

83. **Добросмыслов, С. С.** Изменение теплофизических характеристик наружных ограждающих конструкций в условиях реального температурно-влажностного режима / С. С. Добросмыслов, М. М. Пылаева, Н. В. Огорельцева, М. А. Перькова // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2018. – № 3 (45). – С. 114-120.

84. **Ерофеев, В. Т.** Влажностный режим помещений зданий при наличии в материале стен гигроскопических солей / В. Т. Ерофеев, Т. Ф. Ельчищева // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2018. – № 12 (720). – С. 62-74.

85. **Корниенко, С. В.** Оценка влияния температурно-влажностного режима в краевых зонах ограждающих конструкций на теплозащиту зданий / С. В. Корниенко // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: строительство и архитектура. – 2012. – № 26 (45). – С. 148-154.

86. **Шубин, И. Л.** Морозостойкость, теплозащитные свойства и влажностный режим утепленных крупноформатных керамических блоков / И. Л. Шубин, А. И. Ананьев // Градостроительство. – 2013. – № 2 (24). – С. 89-92.

87. **Береговой, А. М.** Влияние конструктивных особенностей чердачных крыш на микроклимат помещений / А. М. Береговой // Вестник ПГУАС: строительство, наука и образование. – 2018. – № 1 (6). – С. 4-8.

88. **Бухмиров, В. В.** Оценка микроклимата в помещениях жилых, общественных и административных зданий / В. В. Бухмиров, М. В. Пророкова // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2015. – № 4. – С. 5-10.

89. **Гарькавый, К. А.** Анализ эффективности микроклимата помещения / К. А. Гарькавый, С. Н. Бегдай // Энергосбережение и водоподготовка. – 2006. – № 6(44). – С. 76-77.

90. **Гульбинас, А. С.** Определение понятия «микроклимат» помещения с использованием системнокатегориального подхода / А. С. Гульбинас, Н. А. Литвинова // Вестник евразийской науки. – 2021. – Т. 13. — № 5. – URL: <https://esj.today/pdf/15savn521.pdf>.

91. **Дрозд, Д. В.** Влияние ветра на микроклимат в помещении / Д. В. Дрозд, Ю. В. Елистратова, А. С. Семенов // Современные наукоемкие технологии. – 2013. – № 8-1. – С. 37-39.

92. **Игнатьева, М.** Микроклимат офисных помещений / М. Игнатьева // Сантехника, отопление, кондиционирование. – 2010. – № 6 (102). – С. 72-73.

93. **Корниенко, С. В.** Тестирование метода расчета температурно-влажностного режима ограждающих конструкций на результатах натуральных измерений параметров микроклимата помещений / С. В. Корниенко // Инженерно-строительный журнал. – 2012. – № 2 (28). – С. 18-23.

94. **Почекунин, П. С.** Особенности создания параметров микроклимата во влажных помещениях с пониженной температурой / П. С. Почекунин // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. – 2022. – № 1(50). – С. 65-72.

95. **Штым, А. С.** Особенности поддержания микроклимата в помещениях большого объема и с большой площадью остекления / А. С. Штым, Е. В. Тарасова // Вологодские чтения. – 2008. – № 70. – С. 101-103.

96. **СП 63.13330.2025.** Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. – М.: Технорма, 2025. – 133 с.

97. **СанПиН 2.1.2.1002-00.** Проектирование, строительство и эксплуатация жилых зданий, предприятий коммунально-бытового обслуживания, учреждений образования, культуры, отдыха, спорта санитарно-эпидемиологические требования к жилым зданиям и помещениям. – Бюллетень нормативных и методических документов Госсанэпиднадзора. Вып. 2(4). – М.: 2001. – 15 с.

98. **Казачек, В. Г.** Проблемы нормирования сроков службы зданий и сооружений / В. Г. Казачек // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. Ф. Строительство. Прикладные науки. – 2010.– № 6.– С. 56-71.

99. **Келасьев, Н. Г.** Определение срока службы конструкций, зданий и сооружений / Н. Г. Келасьев, Э. Н. Кодыш, Н. Н. Трекин, И. А. Терехов, С. Д. Шмаков, А. Б. Чаганов // Промышленное и гражданское строительство. – 2020. – № 2. – С. 12-17. – DOI: 10.33622/0869-7019.2020.02.12-17.

100. **Терехов, И.А.** Продолжительность периодов безопасной эксплуатации зданий и сооружений с железобетонными конструкциями / И. А. Терехов, Н. Н. Трекин, Э. Н. Кодыш, С. Д. Шмаков // Промышленное и гражданское строительство. – 2024. – № 4. – С. 20-27. – DOI: 10.33622/0869-7019.2024.04.20-27.

101. **Фаликман, В. Р.** Новое методическое пособие по назначению срока службы бетонных и железобетонных конструкций с учетом воздействия среды эксплуатации на их жизненный цикл / В. Р. Фаликман, В. Ф. Степанова // Вестник НИЦ «Строительство». – 2020. – № 4(27). – С. 126-134. – DOI: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2020-4\(27\)-126-134](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2020-4(27)-126-134).

102. **Гениев, Г. А.** Обобщенный критерий длительной прочности тяжелых бетонов / Г. А. Гениев // Известия ОрелГТУ. Серия «Строительство. Транспорт». – 2007. – № 2/14. – С. 17-24.

103. **Бондаренко, В. М.** К вопросу о длительной прочности и выносливости бетона / В. М. Бондаренко, Е. А. Ларионов // Известия ОрелГТУ. Серия «Строительство. Транспорт». – 2005. – № 3-4. – С. 3-6.

104. **Чирков, В. П.** К определению расчетных сопротивлений бетона при заданном сроке службы конструкции / В. П. Чирков // Известия вузов. Строительство. – 1994. – № 9-10. – С. 3-7.

105. **Гарибов, Р. Б.** К вопросу об оценке безопасности и долговечности проектируемых железобетонных конструкций / Р. Б. Гарибов, У. М. Гаджиева, С. Р. Баширзаде // Вестник Волжского регионального отделения РААСН. – 2018. – № 21. – С. 160-164.

106. **Селяев, В. П.** Прогнозирование ресурса железобетонных изгибаемых элементов, работающих в агрессивной среде, по первой стадии предельных состояний / В. П. Селяев, В. М. Бондаренко, П. В. Селяев // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – № 2 (31). – С. 14-24.

107. **Мигунов, В. Н.** Прогнозирование долговечности железобетонных конструкций с учетом образования продольных трещин / В. Н. Мигунов // Известия вузов. Строительство. – 2009. – № 11-12 (611-612). – С. 101-107.

108. **Скоробогатов, С. М.** Живучесть как основа для определения долговечности изгибаемых железобетонных конструкций при обследовании / С. М. Скоробогатов // Бетон и железобетон. – 2006. – № 5. – С. 18-22.

109. **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.

110. **Никулина, Ю. А.** Определение деформативно-прочностных характеристик бетонов с учетом различных влажностных условий на завершающем этапе эксплуатации зданий непроизводственного 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.

111. **Дронов, А. В.** Особенности развития питтинговой коррозии стальной арматуры железобетонных изгибаемых элементов / А. В. Дронов // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2017. – № 3. – С. 32 - 36.

112. **Невилль, А. М.** Свойства бетона / А. М. Невилль. – М.: Стройиздат. – 1972. – 344 с. (Перевод с англ.).

113. **Цилосани, З. Н.** Усадка и ползучесть бетона: монография / З. Н. Цилосани. – Тбилиси: Изд-во «Мецниереба», 1979. – 230 с.

114. **Александровский, С. В.** Расчет бетонных и железобетонных конструкций на изменения температуры и влажности с учетом ползучести бетона / С. В. Александровский. – М.: НИИЖБ, 2004. – 712 с.

115. **Практические способы** учета ползучести и усадки бетона при расчете железобетонных конструкций / А. Б. Голышев, И. Н. Ткаченко. – Киев: Логос, 2000. – 87 с.

116. **Рекомендации** по учету ползучести и усадки бетона при расчете бетонных и железобетонных конструкций / НИИЖБ Госстроя СССР. – М.: Стройиздат, 1988. – 120 с.

117. **Авсюкевич, Д. А.** Графоаналитическая модель параметров микроклимата в чистых помещениях / Д. А. Авсюкевич, М. В. Егоричев // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2024. – № 3 (96). – С. 55-66.

118. **Бурмистрова, В. С.** История развития искусственного интеллекта: от механических автоматов до нейронных сетей / В. С. Бурмистрова // Профессиональные коммуникации в научной среде – фактор обеспечения качества исследований: материалы XIII Всероссийской научно-практической конференции (Альметьевск, 16 апреля 2024 года). – Санкт-Петербург: Сциентиа, 2024. – Том XIII. – С. 158-160.

119. **Долженко, А. В.** Повышение качества управления жизненным циклом плоских рулонных кровель совершенствованием инструментов оценки их физического износа / А. В. Долженко, А. Е. Наумов, О. А. Щенятский // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2023. – №6. – С. 48-54. – DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-6-48-54.

120. **Архив метеорологических наблюдений** [электронный ресурс]. Режим доступа: www.weatherarchive.ru.

121. **Смоляго, Г. А.** Экспериментальные исследования конструкций сборных железобетонных перемычек наружных несущих стен общественного здания / Г. А. Смоляго, Н. В. Фролов // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2018. – Т. 22. – № 5(80). – С. 47-57.

122. **Silva, R.** Comparative study of neural network topologies for predicting indoor environmental quality / R. Silva, M. Dias, P. Alves, E. Oliveira // Building Simulation. – 2023. – Vol. 16(1). – P. 1-18.

123. **Wang, D.** Improving energy efficiency prediction in buildings through optimized neural network architectures / D. Wang, B. Zhao, X. Sun, J. Huang, J. Yan // Energy and Buildings. – 2021. – Vol. 231. – P. 110258.

124. **Wu, X.** An efficient architecture search method for deep convolutional neural networks / X. Wu, Z. Zhu, C.-Y. Chow, W. Liang, L. Guan // Neurocomputing. – 2020. – Vol. 396. – P. 35-45.

125. **Алмазов, В. О.** Проектирование железобетонных конструкций по Евронормам: научное издание / В. О. Алмазов. – М.: Изд-во АСВ, 2011. – 216 с.

126. **Гениев, Г. А.** Прочность и деформативность железобетонных конструкций при запроектных воздействиях: научное издание / Г. А. Гениев, В. И. Колчунов, Н. В. Ключева, А. И. Никулин, К. П. Пятикрестовский. – М.: Изд-во АСВ, 2004. – 216 с.

127. **Кодыш, Э. Н.** Расчет железобетонных конструкций из тяжелого бетона по прочности, трещиностойкости и по деформациям. / Э. Н. Кодыш, И. К. Никитин, Н. Н. Трекин. – М.: Изд-во АСВ. – 2011. – 352 с.

128. **Сулейманова, Л. А.** Поведение бетона под нагрузкой, механизм его разрушения и оценка этого процесса / Л. А. Сулейманова // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2016. – № 1. – С. 68-75.

129. **Бондаренко, В. М.** Некоторые вопросы нелинейной теории железобетона / В. М. Бондаренко. – Харьков: Изд-во ХГУ, 1968. – 324 с.

130. **Адищев, В. В.** Определение коэффициентов трансформации эталонных диаграмм для изгибаемых и внецентренно сжатых железобетонных элементов / В. В. Адищев, Э. В. Березина, Н. В. Ершова // Известия вузов. Строительство. – 2011. – №7. – С. 73-81.

131. **Меркулов, С. И.** Основы теории реконструкции железобетона: монография / С. И. Меркулов. – Курск: Курский гос. техн. унив. – 2009. – 248 с.

132. **Митасов, В. М.** Основные положения энергетической теории сопротивления железобетона / В. М. Митасов, В. В. Адищев // Известия вузов. Строительство. – 2010. – № 6. – С. 3-7.

133. **Никулин, А. И.** Энергетический подход к трансформированию эталонных диаграмм сжатия бетона / А. И. Никулин // Бетон и железобетон. – 2013. – № 5. – С. 12-14.

134. **Никулин, А. И.** Трещиностойкость изгибаемых железобетонных элементов с учетом использования в растянутой зоне различных сочетаний стальной и стеклопластиковой арматуры / А. И. Никулин, Н. В. Фролов, Ю. А. Никулина // Бетон и железобетон. – 2015. – № 3. – С. 18-22.

135. **Несветаев, Г. В.** К созданию нормативной базы деформаций бетона при осевом нагружении / Г. В. Несветаев // Известия вузов. Строительство. – 1996. – № 8. – С. 122-124.

136. **Карпенко, Н. И.** Проектирование бетонных, железобетонных, каменных и армокаменных элементов и конструкций с применением диаграммных методов расчета: монография / Н. И. Карпенко, Б. С. Соколов, О. В. Радайкин. – М.: Изд-во АСВ. – 2019. – 194 с.

137. **Залесов, А. С.** Расчет трещиностойкости железобетонных конструкций по новым нормативным документам / А. С. Залесов, Т. А. Мухамедиев, Е. А. Чистяков // Бетон и железобетон. – 2002. – № 5. – С. 15-19.

138. **Карпенко, Н. И.** Общие модели механики железобетона / Н. И. Карпенко. – М.: Стройиздат, 1996. – 416 с.

139. **Крусь, Ю. А.** Трансформирование диаграмм деформирования бетона при центральном сжатии и растяжении / Ю. А. Крусь // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2008. – №7. – С.113-122.

140. **Чайка, В. П.** Характеристика диаграмм неоднородного сжатия бетона / В. П. Чайка // Бетон и железобетон. – 1994. – № 1. – С. 17-19.

141. **Берг, О. Я.** Физические основы теории прочности бетона и железобетона / О. Я. Берг. – М.: Госстройиздат, 1962. – 96 с.

142. **Никулин, А. И.** К уточнению величин предельных относительных деформаций бетона в сжатой зоне изгибаемых железобетонных элементов / А. И. Никулин // Промышленное и гражданское строительство. – 2014. – № 8. – С. 12-15.

143. **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: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова». Оpubл. 04.09.25.

144. **Никулин, А. И.** О построении методики расчета прочности внецентренно сжатых с малыми эксцентриситетами железобетонных элементов / А. И. Никулин, А. Ф. К. Аль-Хаваф // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2017. – №6. – С. 48-53.

145. **Никулин, А. И.** Прочность внецентренно сжатых железобетонных элементов с трещинами в растянутой зоне / А. И. Никулин, И. А. Ломтев, Ю. А. Никулина // Сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции «Технические науки в мире: от теории к практике». – Выпуск II. – 2015. – С. 58-61.

146. **Никулин, А. И.** Предельная прочность изгибаемых железобетонных элементов на основе применения энергетического критерия разрушения бетона / А. И. Никулин, Д. В. Обернихин, Ю. А. Никулина // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения: материалы международных академических чтений. – Курск: Курск. гос. ун-т. – 2014. – С. 98-107.

147. **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.

148. **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.

149. **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.

150. **Мурашев, В. И.** Трещиностойчивость, жесткость и прочность железобетона / В. И. Мурашев. – М.: Машстройиздат, 1950. – 268 с.

151. **Немировский, Я. М.** Исследование напряженно-деформированного состояния железобетонных элементов с учетом работы растянутого бетона над трещинами и пересмотр на этой основе теории расчета деформаций и раскрытия трещин / Я. М. Немировский // В кн.: Прочность и жесткость железобетонных конструкций. – М.: Стройиздат, 1968. – С. 125-173.

152. **Никулин, А. И.** Совершенствование методики расчета кривизн для участков изгибаемых железобетонных элементов с трещинами в растянутой зоне / А. И. Никулин // Известия Орловского государственного технического университета. Серия: Строительство и транспорт. – 2005. – № 1-2. – С. 37-42.

153. **Никулин, А. И.** Расчет прочности внецентренно сжатых с малыми эксцентриситетами коротких железобетонных элементов на основе энергетического подхода к трансформированию диаграмм сжатия бетона / А. И. Никулин, Е. А. Блинников // Известия Орловского государственного технического университета. Серия: строительство и транспорт. – 2005. – № 3-4. – С. 65-70.

154. **Козлова, Н. И.** Проведение обследования строительных конструкций здания школы с целью строительства надземного перехода / Н. И. Козлова // Международный научный журнал «Синергия наук». – 2017. – № S14. – С. 123-127.

155. **Чечель, И. П.** Развитие архитектуры общеобразовательных школ в Белгородской области в 1980 – 1990 гг. / И. П. Чечель, И. Н. Чечель // Сборник научных статей 4-й Международной научной конференции перспективных

разработок молодых ученых «Наука молодых - будущее России». – Курск. – 2019. – С. 402-208.

156. **Чечель, И. П.** Формирование и развитие функционально-планировочной структуры общеобразовательных школ Белгородской области (1904 -2020 гг) / И. П. Чечель // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2020. – Т. 5, № 7. – С. 49-65. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-7-49-65.

157. **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.

158. **Зимин, С. С.** Причины деструкции кладки наружных стен технического этажа / С. С. Зимин, О. В. Романова, Н. П. Романов // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2014. – № 12 (27). – С. 112-122.

159. **Карпов, В. Н.** Оценка технического состояния железобетонных плит перекрытий технического этажа здания железнодорожного вокзала / В. Н. Карпов, Д. В. Богданов // Образование и наука в современном мире. Инновации. – 2024. – № 1 (50). – С. 146-151.

160. **Римшин, В. И.** Методы комплексной оценки технического состояния здания медицинского назначения в рамках его капитального ремонта / В. И. Римшин, И. С. Кузина, Е. С. Кецко, А. Н. Выдрин // Университетская наука. – 2025. – № 1 (19). – С. 67-74.

161. **Слепченко, П. Д.** Влияние температурно-влажностного режима на строительные конструкции подвалов зданий старого фонда Санкт-Петербурга / П. Д. Слепченко, Л. Н. Синяков // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2017. – № 3 (54). – С. 18-34.

162. **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.

163. **Официальный сайт** государственной информационной системы обеспечения градостроительной деятельности Российской Федерации (ГИСОГД РФ) [электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://gisogd.gov.ru>.

164. **Градостроительный кодекс** Российской Федерации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_51040/

165. **Постановление Правительства РФ** от 12 сентября 2020 г. № 1416 «Об утверждении Правил формирования и ведения классификатора строительной информации». – Собрание законодательства Российской Федерации. – 2020. – №38. – С. 5890.

166. **Постановление Правительства Российской Федерации № 1431** от 15 сентября 2020 г. «Об утверждении Правил формирования и ведения информационной модели объекта капитального строительства, состава сведений, документов и материалов, включаемых в информационную модель объекта капитального строительства и представляемых в форме электронных документов, и требований к форматам указанных электронных документов, а также о внесении изменения в пункт 6 Положения о выполнении инженерных изысканий для подготовки проектной документации, строительства, реконструкции объектов капитального строительства». – Собрание законодательства Российской Федерации. – 2024. – №21. – С. 2781.

167. **Приказ Министерства** строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 06.08.2020 № 430/пр. «Об утверждении структуры и состава классификатора строительной информации» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.pravo.gov.ru.

168. **Мамыкин, А. П.** Устройства управления микроклиматом в помещении / А. П. Мамыкин, В. Я. Баннов, В. А. Соловьев, В. А. Трусков, Ж. Кабдуалиев // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». – 2023. – Т. 2. – С. 220-223.

169. **Рудик, Д. А.** Разработка системы благоприятного микроклимата жилых помещений / Д. А. Рудик, Л. Е. Лымбина // Материалы международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых «Энерго- и

ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере». – 2015. – Т. 3. – № 1. – С. 203-205.

170. **Степанов, И. О.** Применение цифрового двойника для мониторинга микроклимата в помещении / И. О. Степанов, Д. В. Крайнов // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2024. – № 2 (68). – С. 26-36.

171. **Баталов, С. В.** Утилизация строительных отходов при новом строительстве, сносе и рекультивации земель / С. В. Баталов // Перспективы науки. – 2021. – № 5 (140). – С. 135-140.

172. **Галимзянова, Т. Г.** Технологии переработки отходов строительства и сноса / Т. Г. Галимзянова, Е. В. Шилова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Серия: Прикладная экология. Урбанистика. – 2021. – № 4 (44). – С. 116-126.

173. **Гумерова, Г. И.** Проектирование линии для переработки отходов строительства и сноса / Г. И. Гумерова, О. С. Сибгатуллина, Л. С. Семенов // Сборник трудов международной научной конференции: «Химия и инженерная экология – XVIII». – Казань, 2018. – С. 33-38.

174. **Дмитриев, А. Н.** Развитие нормативной базы управления проектами на стадии демонтажа и утилизации жизненного цикла объектов недвижимости / А. Н. Дмитриев, В. В. Гурьев, В. В. Гранев // Материалы XI Международной научно-практической конференции, посвященной 25-летию юбилею кафедры и 114-летию РЭУ им. Г. В. Плеханова: «Современные проблемы управления проектами в инвестиционно-строительной сфере и природопользовании». – 2021. – С. 24-35.

175. **Ковалев, Р. Б.** Оценка риска в строительстве на различных стадиях жизненного цикла / Р. Б. Ковалев, Б. И. Ковалев // Материалы VIII Международной молодежной научной конференции «Молодежь и XXI век – 2018». – Курск, 2018. – Т. 4. – С. 288-291.

176. **Сайманова, О. Г.** Исследование российского рынка предприятий-переработчиков строительных отходов / О. Г. Сайманова // Вестник Поволжского

государственного университета сервиса. Серия: Экономика. – 2021. – № 3 (66). – С. 28-30.

177. **Аль-Хаваф, А. Ф. К.** Аналитический обзор физико-механических свойств бетонов, содержащих крупный заполнитель из бетонного боя / А. Ф. К. Аль-Хаваф // Материалы X Международного молодежного форума с международным участием «Образование. Наука. Производство.» – 2018. – С. 658-662.

178. **Аль-Хаваф, А. Ф. К.** Современная технология производства бетона с добавлением крупного заполнителя из бетонного боя для изготовления несущих железобетонных конструкций / А. Ф. К. Аль-Хаваф, А. И. Никулин // Сборник научных статей Всероссийской научной конференции «Проблемы и перспективы развития России: молодежный взгляд в будущее». – 2018. – Т. 3. – С. 220-224.

179. **Денисов, В. Н.** Утилизация материалов от сноса зданий и сооружений / В. Н. Денисов, Д. С. Курочкин // Сборник статей межвузовской научно-практической конференции «Актуальные проблемы естественных и технических наук». – Санкт-Петербург. – 2021. – С. 102-109.

180. **Официальный сайт** Регионального центра ценообразования в строительстве [электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://rccs.ru>.

181. **Официальный сайт** ООО «Самарский бетон» [электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://samarskiy-beton.ru>.

ПРИЛОЖЕНИЯ

**Свидетельство о государственной регистрации
программы для ЭВМ №2025683583**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



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**

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова» (RU)*

Авторы: *Никулина Юлия Александровна (RU), Сулейманова
Людмила Александровна (RU), Никулин Александр Иванович
(RU), Шаранов Олег Николаевич (RU)*



Заявка № **2025682404**

Дата поступления **25 июля 2025 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **04 сентября 2025 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Ю.С. Зубов

**Свидетельство о государственной регистрации
программы для ЭВМ №2020616406**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2020616406

**«Расчет прочности и трещиностойкости предварительно
напряженных железобетонных балок прямоугольного
поперечного сечения»**

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования «Белгородский
государственный технологический университет им. В.Г.
Шухова» (RU)*

Авторы: *Никулина Юлия Александровна (RU),
Никулин Александр Иванович (RU)*

Заявка № **2020615408**

Дата поступления **27 мая 2020 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **17 июня 2020 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 **Г.П. Ивлиев**



Свидетельство о регистрации ноу-хау №20260004

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
**«БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ им. В.Г. ШУХОВА»**
(БГТУ им. В.Г. Шухова)



**СВИДЕТЕЛЬСТВО
о регистрации ноу-хау**

№ 20260004

**«Способ определения прочностных параметров
бетонов при длительных нагрузках в зависимости
от влажностных условий»**

Правообладатель(ли): Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
**«Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова»**

Автор(ы): Сулейманова Людмила Александровна,
Никулина Юлия Александровна, Никулин Александр Иванович,
Шарапов Олег Николаевич, Рябчевский Игорь Сергеевич

Дата регистрации: 12 марта 2026 г.

Срок охраны сведений: 10 лет

Ректор  **С.Н. Глаголев**

**Фрагмент обучающего датасета, собранного на основе данных о здании
школы в г. Белгород за 50 лет**

Конструкция	Среднесуточная температура наружного воздуха,	Относительная влажность наружного воздуха, %	Атмосферное давление, мбар	Скорость ветра, м/с	Ориентация конструкции по сторонам света	Относительная влажность в помещении, %	Текущий срок, t_i , годы	Усредненная относительная влажность в помещении	Остаточный ресурс, годы
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
101	-2,88	92,13	1029	2	0,10	52,13	3,0000	52,13	92
102	-2,88	92,13	1029	2	0,05	52,13	3,0000	52,13	92
103	-2,88	92,13	1029	2	0,05	52,13	3,0000	52,13	92
104	-2,88	92,13	1029	2	0,00	52,13	3,0000	52,13	92
101	2,25	97,50	1012	6	0,10	57,50	3,0192	54,82	93
102	2,25	97,50	1012	6	0,05	57,50	3,0192	54,82	93
103	2,25	97,50	1012	6	0,05	57,50	3,0192	54,82	93
104	2,25	97,50	1012	6	0,00	57,50	3,0192	54,82	93
101	1,29	93,00	1008	5	0,10	53,00	3,0385	54,21	93
102	1,29	93,00	1008	5	0,05	53,00	3,0385	54,21	93
103	1,29	93,00	1008	5	0,05	53,00	3,0385	54,21	93
104	1,29	93,00	1008	5	0,00	53,00	3,0385	54,21	93
101	-11,75	82,38	1010	5	0,10	42,38	3,0577	51,25	92
102	-11,75	82,38	1010	5	0,05	42,38	3,0577	51,25	92
103	-11,75	82,38	1010	5	0,05	42,38	3,0577	51,25	92
104	-11,75	82,38	1010	5	0,00	42,38	3,0577	51,25	92
101	-25,67	69,33	1037	8	0,10	40,00	3,0769	49,00	91
102	-25,67	69,33	1037	8	0,05	40,00	3,0769	49,00	91
103	-25,67	69,33	1037	8	0,05	40,00	3,0769	49,00	91
104	-25,67	69,33	1037	8	0,00	40,00	3,0769	49,00	91
101	-8	97,50	1023	0	0,10	57,50	3,0962	50,42	91
102	-8	97,50	1023	0	0,05	57,50	3,0962	50,42	91
103	-8	97,50	1023	0	0,05	57,50	3,0962	50,42	91
104	-8	97,50	1023	0	0,00	57,50	3,0962	50,42	91
101	2,6	96,00	1015	4	0,10	56,00	3,1154	51,22	92
102	2,6	96,00	1015	4	0,05	56,00	3,1154	51,22	92
103	2,6	96,00	1015	4	0,05	56,00	3,1154	51,22	92
104	2,6	96,00	1015	4	0,00	56,00	3,1154	51,22	92
101	3	81,00	1010	4	0,10	41,00	3,1346	49,94	91
102	3	81,00	1010	4	0,05	41,00	3,1346	49,94	91
103	3	81,00	1010	4	0,05	41,00	3,1346	49,94	91

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
104	3	81,00	1010	4	0,00	41,00	3,1346	49,94	91
101	-2,33	64,50	1025	5	0,10	40,00	3,1538	48,83	91
102	-2,33	64,50	1025	5	0,05	40,00	3,1538	48,83	91
103	-2,33	64,50	1025	5	0,05	40,00	3,1538	48,83	91
104	-2,33	64,50	1025	5	0,00	40,00	3,1538	48,83	91
101	2,13	83,50	1023	5	0,10	43,50	3,1731	48,30	90
102	2,13	83,50	1023	5	0,05	43,50	3,1731	48,30	90
103	2,13	83,50	1023	5	0,05	43,50	3,1731	48,30	90
104	2,13	83,50	1023	5	0,00	43,50	3,1731	48,30	90
101	-0,5	74,00	1019	4	0,10	40,00	3,1923	47,55	90
102	-0,5	74,00	1019	4	0,05	40,00	3,1923	47,55	90
103	-0,5	74,00	1019	4	0,05	40,00	3,1923	47,55	90
104	-0,5	74,00	1019	4	0,00	40,00	3,1923	47,55	90
101	4,5	89,00	1005	5	0,10	49,00	3,2115	47,67	90
102	4,5	89,00	1005	5	0,05	49,00	3,2115	47,67	90
103	4,5	89,00	1005	5	0,05	49,00	3,2115	47,67	90
104	4,5	89,00	1005	5	0,00	49,00	3,2115	47,67	90
101	5,86	80,00	1020	6	0,10	40,00	3,2308	47,08	90
102	5,86	80,00	1020	6	0,05	40,00	3,2308	47,08	90
103	5,86	80,00	1020	6	0,05	40,00	3,2308	47,08	90
104	5,86	80,00	1020	6	0,00	40,00	3,2308	47,08	90
101	0,25	48,50	1017	4	0,10	40,00	3,2500	46,57	90
102	0,25	48,50	1017	4	0,05	40,00	3,2500	46,57	90
103	0,25	48,50	1017	4	0,05	40,00	3,2500	46,57	90
104	0,25	48,50	1017	4	0,00	40,00	3,2500	46,57	90
101	4	98,25	1008	5	0,10	58,25	3,2692	47,35	90
102	4	98,25	1008	5	0,05	58,25	3,2692	47,35	90
103	4	98,25	1008	5	0,05	58,25	3,2692	47,35	90
104	4	98,25	1008	5	0,00	58,25	3,2692	47,35	90
101	12,86	68,00	1021	4	0,10	60,00	3,2885	48,14	90
102	12,86	68,00	1021	4	0,05	60,00	3,2885	48,14	90
103	12,86	68,00	1021	4	0,05	60,00	3,2885	48,14	90
104	12,86	68,00	1021	4	0,00	60,00	3,2885	48,14	90
101	11,2	59,00	1019	6	0,10	59,00	3,3077	48,78	90
102	11,2	59,00	1019	6	0,05	59,00	3,3077	48,78	90
103	11,2	59,00	1019	6	0,05	59,00	3,3077	48,78	90
104	11,2	59,00	1019	6	0,00	59,00	3,3077	48,78	90
101	14,88	67,50	1006	3	0,10	60,00	3,3269	49,40	91
102	14,88	67,50	1006	3	0,05	60,00	3,3269	49,40	91
103	14,88	67,50	1006	3	0,05	60,00	3,3269	49,40	91
104	14,88	67,50	1006	3	0,00	60,00	3,3269	49,40	91
101	12	45,43	1026	4	0,10	45,43	3,3462	49,19	91

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
102	12	45,43	1026	4	0,05	45,43	3,3462	49,19	91
103	12	45,43	1026	4	0,05	45,43	3,3462	49,19	91
104	12	45,43	1026	4	0,00	45,43	3,3462	49,19	91
101	18,38	68,75	1016	6	0,10	60,00	3,3654	49,73	91
102	18,38	68,75	1016	6	0,05	60,00	3,3654	49,73	91
103	18,38	68,75	1016	6	0,05	60,00	3,3654	49,73	91
104	18,38	68,75	1016	6	0,00	60,00	3,3654	49,73	91
101	21,88	43,00	1023	4	0,10	43,00	3,3846	49,41	91
102	21,88	43,00	1023	4	0,05	43,00	3,3846	49,41	91
103	21,88	43,00	1023	4	0,05	43,00	3,3846	49,41	91
104	21,88	43,00	1023	4	0,00	43,00	3,3846	49,41	91
101	17,25	85,75	1007	5	0,10	60,00	3,4038	49,90	91
102	17,25	85,75	1007	5	0,05	60,00	3,4038	49,90	91
103	17,25	85,75	1007	5	0,05	60,00	3,4038	49,90	91
104	17,25	85,75	1007	5	0,00	60,00	3,4038	49,90	91
101	21,5	48,00	1017	4	0,10	48,00	3,4231	49,81	91
102	21,5	48,00	1017	4	0,05	48,00	3,4231	49,81	91
103	21,5	48,00	1017	4	0,05	48,00	3,4231	49,81	91
104	21,5	48,00	1017	4	0,00	48,00	3,4231	49,81	91
101	15,57	65,57	1008	6	0,10	65,57	3,4423	50,47	91
102	15,57	65,57	1008	6	0,05	65,57	3,4423	50,47	91
103	15,57	65,57	1008	6	0,05	65,57	3,4423	50,47	91
104	15,57	65,57	1008	6	0,00	65,57	3,4423	50,47	91
101	12,83	66,00	1012	4	0,10	66,00	3,4615	51,09	91
102	12,83	66,00	1012	4	0,05	66,00	3,4615	51,09	91
103	12,83	66,00	1012	4	0,05	66,00	3,4615	51,09	91
104	12,83	66,00	1012	4	0,00	66,00	3,4615	51,09	91
101	14,83	77,17	1009	5	0,10	77,17	3,4808	52,09	92
102	14,83	77,17	1009	5	0,05	77,17	3,4808	52,09	92
103	14,83	77,17	1009	5	0,05	77,17	3,4808	52,09	92
104	14,83	77,17	1009	5	0,00	77,17	3,4808	52,09	92
101	18,38	61,50	1020	3	0,10	61,50	3,5000	52,44	92
102	18,38	61,50	1020	3	0,05	61,50	3,5000	52,44	92
103	18,38	61,50	1020	3	0,05	61,50	3,5000	52,44	92
104	18,38	61,50	1020	3	0,00	61,50	3,5000	52,44	92
101	20,29	66,29	1010	2	0,10	66,29	3,5192	52,94	92
102	20,29	66,29	1010	2	0,05	66,29	3,5192	52,94	92
103	20,29	66,29	1010	2	0,05	66,29	3,5192	52,94	92
104	20,29	66,29	1010	2	0,00	66,29	3,5192	52,94	92
101	24	52,29	1015	4	0,10	52,29	3,5385	52,91	92
102	24	52,29	1015	4	0,05	52,29	3,5385	52,91	92
103	24	52,29	1015	4	0,05	52,29	3,5385	52,91	92

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
104	24	52,29	1015	4	0,00	52,29	3,5385	52,91	92
101	22,75	40,25	1015	3	0,10	40,25	3,5577	52,49	92
102	22,75	40,25	1015	3	0,05	40,25	3,5577	52,49	92
103	22,75	40,25	1015	3	0,05	40,25	3,5577	52,49	92
104	22,75	40,25	1015	3	0,00	40,25	3,5577	52,49	92
101	24,86	45,29	1016	2	0,10	45,29	3,5769	52,26	92
102	24,86	45,29	1016	2	0,05	45,29	3,5769	52,26	92
103	24,86	45,29	1016	2	0,05	45,29	3,5769	52,26	92
104	24,86	45,29	1016	2	0,00	45,29	3,5769	52,26	92
101	19,5	68,00	1012	3	0,10	68,00	3,5962	52,75	92
102	19,5	68,00	1012	3	0,05	68,00	3,5962	52,75	92
103	19,5	68,00	1012	3	0,05	68,00	3,5962	52,75	92
104	19,5	68,00	1012	3	0,00	68,00	3,5962	52,75	92
101	25,71	54,29	1014	2	0,10	54,29	3,6154	52,80	92
102	25,71	54,29	1014	2	0,05	54,29	3,6154	52,80	92
103	25,71	54,29	1014	2	0,05	54,29	3,6154	52,80	92
104	25,71	54,29	1014	2	0,00	54,29	3,6154	52,80	92
101	22,86	42,57	1015	2	0,10	42,57	3,6346	52,50	92
102	22,86	42,57	1015	2	0,05	42,57	3,6346	52,50	92
103	22,86	42,57	1015	2	0,05	42,57	3,6346	52,50	92
104	22,86	42,57	1015	2	0,00	42,57	3,6346	52,50	92
101	14,75	89,75	1007	3	0,10	60,00	3,6538	52,71	92
102	14,75	89,75	1007	3	0,05	60,00	3,6538	52,71	92
103	14,75	89,75	1007	3	0,05	60,00	3,6538	52,71	92
104	14,75	89,75	1007	3	0,00	60,00	3,6538	52,71	92
101	14,43	63,71	1022	6	0,10	60,00	3,6731	52,91	92
102	14,43	63,71	1022	6	0,05	60,00	3,6731	52,91	92
103	14,43	63,71	1022	6	0,05	60,00	3,6731	52,91	92
104	14,43	63,71	1022	6	0,00	60,00	3,6731	52,91	92
101	17	44,86	1022	5	0,10	44,86	3,6923	52,70	92
102	17	44,86	1022	5	0,05	44,86	3,6923	52,70	92
103	17	44,86	1022	5	0,05	44,86	3,6923	52,70	92
104	17	44,86	1022	5	0,00	44,86	3,6923	52,70	92
101	8,5	58,50	1026	3	0,10	58,50	3,7115	52,85	92
102	8,5	58,50	1026	3	0,05	58,50	3,7115	52,85	92
103	8,5	58,50	1026	3	0,05	58,50	3,7115	52,85	92
104	8,5	58,50	1026	3	0,00	58,50	3,7115	52,85	92
101	10,25	87,00	1004	7	0,10	60,00	3,7308	53,03	92
102	10,25	87,00	1004	7	0,05	60,00	3,7308	53,03	92
103	10,25	87,00	1004	7	0,05	60,00	3,7308	53,03	92
104	10,25	87,00	1004	7	0,00	60,00	3,7308	53,03	92
101	3,2	69,00	1029	4	0,10	60,00	3,7500	53,21	92

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
102	3,2	69,00	1029	4	0,05	60,00	3,7500	53,21	92
103	3,2	69,00	1029	4	0,05	60,00	3,7500	53,21	92
104	3,2	69,00	1029	4	0,00	60,00	3,7500	53,21	92
101	3	71,67	1031	2	0,10	60,00	3,7692	53,37	92
102	3	71,67	1031	2	0,05	60,00	3,7692	53,37	92
103	3	71,67	1031	2	0,05	60,00	3,7692	53,37	92
104	3	71,67	1031	2	0,00	60,00	3,7692	53,37	92
101	13,2	76,00	1009	4	0,10	40,00	3,7885	53,05	92
102	13,2	76,00	1009	4	0,05	40,00	3,7885	53,05	92
103	13,2	76,00	1009	4	0,05	40,00	3,7885	53,05	92
104	13,2	76,00	1009	4	0,00	40,00	3,7885	53,05	92
101	-2,5	77,00	1017	5	0,10	40,00	3,8077	52,75	92
102	-2,5	77,00	1017	5	0,05	40,00	3,8077	52,75	92
103	-2,5	77,00	1017	5	0,05	40,00	3,8077	52,75	92
104	-2,5	77,00	1017	5	0,00	40,00	3,8077	52,75	92
101	3,33	44,33	1027	1	0,10	40,00	3,8269	52,46	92
102	3,33	44,33	1027	1	0,05	40,00	3,8269	52,46	92
103	3,33	44,33	1027	1	0,05	40,00	3,8269	52,46	92
104	3,33	44,33	1027	1	0,00	40,00	3,8269	52,46	92
101	4,25	92,00	1021	4	0,10	52,00	3,8462	52,45	91
102	4,25	92,00	1021	4	0,05	52,00	3,8462	52,45	91
103	4,25	92,00	1021	4	0,05	52,00	3,8462	52,45	91
104	4,25	92,00	1021	4	0,00	52,00	3,8462	52,45	91
101	2,25	95,00	1024	4	0,10	55,00	3,8654	52,51	91
102	2,25	95,00	1024	4	0,05	55,00	3,8654	52,51	91
103	2,25	95,00	1024	4	0,05	55,00	3,8654	52,51	91
104	2,25	95,00	1024	4	0,00	55,00	3,8654	52,51	91
101	-1	71,33	1030	7	0,10	40,00	3,8846	52,24	91
102	-1	71,33	1030	7	0,05	40,00	3,8846	52,24	91
103	-1	71,33	1030	7	0,05	40,00	3,8846	52,24	91
104	-1	71,33	1030	7	0,00	40,00	3,8846	52,24	91
101	-7,13	65,50	1027	4	0,10	40,00	3,9038	51,98	91
102	-7,13	65,50	1027	4	0,05	40,00	3,9038	51,98	91
103	-7,13	65,50	1027	4	0,05	40,00	3,9038	51,98	91
104	-7,13	65,50	1027	4	0,00	40,00	3,9038	51,98	91
101	-11,13	91,38	1031	3	0,10	51,38	3,9231	51,97	91
102	-11,13	91,38	1031	3	0,05	51,38	3,9231	51,97	91
103	-11,13	91,38	1031	3	0,05	51,38	3,9231	51,97	91
104	-11,13	91,38	1031	3	0,00	51,38	3,9231	51,97	91
101	-1,29	99,00	1017	3	0,10	59,00	3,9423	52,11	91
102	-1,29	99,00	1017	3	0,05	59,00	3,9423	52,11	91
103	-1,29	99,00	1017	3	0,05	59,00	3,9423	52,11	91

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
104	-1,29	99,00	1017	3	0,00	59,00	3,9423	52,11	91
101	2,75	89,88	1012	4	0,10	49,88	3,9615	52,07	91
102	2,75	89,88	1012	4	0,05	49,88	3,9615	52,07	91
103	2,75	89,88	1012	4	0,05	49,88	3,9615	52,07	91
104	2,75	89,88	1012	4	0,00	49,88	3,9615	52,07	91
101	3,25	83,50	1003	6	0,10	43,50	3,9808	51,90	91
102	3,25	83,50	1003	6	0,05	43,50	3,9808	51,90	91
103	3,25	83,50	1003	6	0,05	43,50	3,9808	51,90	91
104	3,25	83,50	1003	6	0,00	43,50	3,9808	51,90	91

**Акт о внедрении результатов диссертационной работы предприятия
Общество с ограниченной ответственностью «ЦЕНТРОГИПРОРУДА»**



ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ

«ЦЕНТРОГИПРОРУДА»

ОГРН 1033107019373, ИНН/КПП 3123095569/312301001
308007, г. Белгород, ул. Мичурина, 56, **E-mail: cgr@bk.ru**
Тел: (4722) 26-45-41, тел/факс: (4722) 26-53-30

23.01.2026 № 040/01

На № _____ от _____




АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы
на соискание ученой степени кандидата технических наук
Никулиной Юлии Александровны
на тему: «Управление жизненным циклом каркасных гражданских зданий
с учетом влажностных условий их эксплуатации»

Результаты диссертационной работы Ю.А. Никулиной, в виде методики определения прочностных параметров бетонов на завершающем этапе эксплуатации зданий при длительных нагрузках в зависимости от влажностных условий и соответствующей программы расчёта для ЭВМ (свидетельство о государственной регистрации программы №2025683583), были применены в качестве дополнительного расчётного аппарата для прогнозирования остаточного ресурса сборных железобетонных конструкций (перекрытий) здания административно-бытового корпуса Михайловского ГОКа им. А.В. Варичева, расположенного в г. Железнодорожск. Это позволило на этапе разработки проекта реконструкции объекта капитального строительства, теоретически обоснованно прогнозировать работу железобетонных конструкций балочного типа на всех этапах их деформирования в процессе длительной эксплуатации вплоть до исчерпания несущей способности, включая разработку мероприятий, способствующих увеличению срока службы несущих конструкций и здания в целом.

Таким образом, материалы, представленные в диссертации, выполненной Никулиной Юлией Александровной, представляют собой практическую ценность.

Начальник строительного отдела  Н.В. Зарва

**Акт о внедрении результатов диссертационной работы предприятия
Общество с ограниченной ответственностью «ЭКОМИР ЖБК-1»**



**Общество с ограниченной
ответственностью
«ЭКОМИР ЖБК-1»**

Россия, 308029 г. Белгород,
ул. Коммунальная 15 пом.38,
тел/факс (4722) 56-80-29
ОКПО 92882953 ОГРН 1123123000076
ИНН 3123294236, КПП 312301001
р/с 40702810007000008944
к/с 30101810100000000633 БИК 041403633
в Белгородское отделение №8592
ПАО Сбербанк в г. Белгороде

УТВЕРЖДАЮ

**Директор
ООО «Экомир ЖБК-1»**

О.Н. Шарапов



АКТ

**о внедрении результатов диссертационной работы
на соискание ученой степени кандидата технических наук
Никулиной Юлии Александровны
на тему: «Управление жизненным циклом каркасных гражданских
зданий с учетом влажностных условий их эксплуатации»**

Комиссия в составе:

представители ООО «Экомир ЖБК-1»

главный инженер Зацепин Н.В.

представители БГТУ им. В.Г. Шухова

зав. кафедрой СиГХ, д-р техн. наук, проф. Сулейманова Л.А.,

соискатель Никулина Ю.А.

составили настоящий акт о том, что результаты научно-исследовательской работы Никулиной Ю.А., представленные разработанной методикой определения прочностных параметров бетонов на завершающем этапе эксплуатации зданий при длительных нагрузках в зависимости от влажностных условий; разработанной моделью искусственной нейронной сети для прогнозирования остаточного ресурса объекта капитального строительства на этапе эксплуатации; механизмом принятия управленческих решений для гражданских зданий с учетом влажностных условий помещений

на этапе проектирования, внедрены при проведении мониторинга технического состояния эксплуатируемых зданий на ул. Лосева в г. Белгород, и позволили разработать рекомендации по проведению мероприятий, обеспечивающих повышение срока службы железобетонных конструкций эксплуатируемого объекта.

Главный инженер
ООО «Экомир ЖБК-1»



Н.В. Зацепин

Зав. кафедрой СиГХ,
БГТУ им. В.Г. Шухова,
д-р техн. наук, проф.



Л.А. Сулейманова

Соискатель



Ю.А. Никулина

Справка о внедрении результатов работы в учебный процесс

УТВЕРЖДАЮ



Проректор по цифровой
трансформации и образовательной
деятельности
ВНТУ им. В.Г. Шухова
д-р техн. наук, профессор
И.А. Новиков

03 2026 г.

СПРАВКА

о внедрении результатов научно-исследовательской работы в учебный процесс

Теоретические положения, полученные при выполнении диссертационной работы Никулиной Ю.А. «Управление жизненным циклом каркасных гражданских зданий с учетом влажностных условий их эксплуатации», раскрывающие особенности влияния влажностных условий эксплуатации на продолжительность жизненного цикла объекта капитального строительства и возможность принятия управленческих решений для повышения срока службы, используются в учебном процессе при подготовке специалистов по направлению 08.03.01, 08.04.01 Строительство, что отражено в рабочих программах дисциплин «Реконструкция зданий и сооружений», «Эксплуатация и техническое обслуживание зданий и сооружений», «Автоматизация расчёта и проектирования строительных конструкций», «Оценка технического состояния строительных конструкций зданий и сооружений»; по научной специальности 2.1.14 «Управление жизненным циклом объектов строительства», что отражено в рабочих программах дисциплин «Управление жизненным циклом объектов строительства», «Теоретические основы этапов жизненного цикла объектов строительства», «Технологии информационного и математического моделирования в управлении жизненным циклом объекта строительства».

Директор
Инженерно-строительного института,
д-р техн. наук, профессор

А.Б. Гольцов

Заведующий кафедрой
строительства и городского хозяйства,
д-р техн. наук, профессор

Л.А. Сулейманова

Графическая интерпретация механизма управления жизненным циклом гражданских зданий с железобетонным каркасом с учетом влажностных условий их эксплуатации

