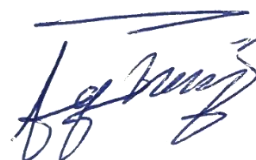


**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ им. В.Г. ШУХОВА»**

На правах рукописи



ОБАЙДИ АДХАМ АБДУЛСАТТАР ХАМИД

**УПРАВЛЕНИЕ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ОБЪЕКТОВ
КАПИТАЛЬНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА НЕЙРОСЕТЕВЫМ
ПРОГНОЗИРОВАНИЕМ ТЕПЛОПOTЕРЬ ЗДАНИЯ**

**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 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА.....	14
1.1. Существующие подходы к управлению и оценке жизненного цикла объектов капитального строительства	14
1.2. Нормативно-правовая база управления жизненным циклом объектов капитального строительства	21
1.3. Методы управления энергоэффективностью объектов капитального строительства в течение их жизненного цикла	28
1.4. Анализ методов прогнозирования при управлении жизненным циклом объектов капитального строительства	32
1.5. Выводы по первой главе	44
2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ	46
2.1. Постановка цели и задач исследования	46
2.2. Разработка структуры модели искусственной нейронной сети и алгоритма машинного обучения.....	48
2.2.1. Разработка структуры модели искусственной нейронной сети.....	51
2.2.2. Теоретические основы разработки модели искусственной нейронной сети.....	55
2.2.3. Теоретические основы разработки алгоритма машинного обучения	59
2.3. Выводы по второй главе.....	63
3. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЗДАНИЙ ИЗ ГАЗОБЕТОННЫХ БЛОКОВ.....	64
3.1. Формирование набора экспериментальных данных для определения теплотерь через ограждающие конструкции	64
3.2. Разработка энергоэффективной составной перемычки из газобетонных блоков	72
3.2.1. Исследование прочностных и деформативных характеристик составной перемычки	73
3.2.1.1. Методика проведения экспериментальных исследований	73
3.2.1.2. Испытания газобетонных перемычек.....	79

3.2.1.3. Результаты испытаний газобетонных перемычек и их анализ.....	82
3.2.1.4. Компьютерное моделирование изгибаемых газобетонных элементов.....	87
3.2.1.5. Анализ экспериментальных и численных исследований изгибаемых газобетонных элементов.....	89
3.2.2. Исследование теплозащитных свойств составных перемычек из газобетонных блоков	90
3.2.2.1. Определение приведенного сопротивления теплопередаче армированных газобетонных перемычек.....	93
3.2.2.2. Определение приведенного сопротивления теплопередаче составной перемычки из газобетонных блоков в составе ограждающей конструкции.....	100
3.2.2.3. Компьютерное моделирование ограждающей конструкции из газобетонных блоков	105
3.2.3. Оценка степени эффективности применения составных газобетонных перемычек	108
3.3. Выводы по третьей главе	109
4. ОБУЧЕНИЕ РАЗРАБОТАННОЙ МОДЕЛИ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ И АЛГОРИТМА МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ	112
4.1. Обучение модели искусственной нейронной сети.....	112
4.2. Обучение алгоритма машинного обучения	123
4.3. Анализ полученных моделей	130
4.4. Оптимизация точности прогноза.....	133
4.5. Выводы по четвертой главе	137
5. РАЗРАБОТКА МЕТОДА УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ОБЪЕКТОВ КАПИТАЛЬНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ	138
5.1. Управление жизненным циклом объекта капитального строительства на этапе проектирования	138
5.1.1. Прогнозирование теплопотерь здания через ограждающие конструкции с учетом применяемой перемычки	138

5.1.2. Оценка экономической эффективности прогнозирования теплопотерь здания через ограждающие конструкции с учетом применяемой перемычки.....	140
5.2. Апробация результатов исследований	142
5.3. Выводы по пятой главе	146
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	148
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	150
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	169
Приложение А. Данные об эксплуатационных показателях многоквартирного дома по ул. Квасова города Белгорода в январе 2023 г.	170
Приложение Б. Патент на полезную модель № 215740	176
Приложение В. Патент на полезную модель № 221280.....	177
Приложение Г. Патент на полезную модель № 222449	178
Приложение Д. Свидетельство о государственной регистрации Базы данных № 2023623566	179
Приложение Е. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2023681552	180
Приложение Ж. Программа расчета приведенного сопротивления теплопередаче составных перемычек из ячеистобетонных блоков.....	181
Приложение И. Акт о внедрении результатов диссертационной работы предприятия «Assad Babel For Building Technology»	189
Приложение К. Акт о внедрении результатов диссертационной работы предприятия «Factory for production lightweight blocks».....	190
Приложение Л. Справка о внедрении результатов работы в учебный процесс	191

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность. В настоящее время влияние строительной отрасли на общее потребление энергии и использование материальных ресурсов в России и за рубежом ежегодно возрастает. С учетом этой тенденции разработка и внедрение инновационных строительных систем из энергоэффективных материалов становится крайне важным аспектом. Тепловая защищенность здания является важнейшей расчетной характеристикой, обеспечиваемой рациональным проектированием его конструктивных и объемно-планировочных решений, возводимых, обновляемых и реконструируемых на этапах жизненного цикла объекта строительства, тем самым позволяя использовать достигаемые показатели тепловой защиты как критерии эффективности управления жизненным циклом.

Наиболее перспективным механизмом прогнозирования энергоэффективности зданий на этапах жизненного цикла здания, включающих проектирование и реализацию улучшающих теплотехнические характеристики объекта строительно-конструктивных решений, является применение передовых методов анализа данных и моделирования, включая интеграцию искусственных нейронных сетей (ИНС) и алгоритмов машинного обучения (МО). Эти инновационные подходы позволяют разрабатывать советуемые системы в управлении, способные в динамически изменяющихся условиях функциональной и окружающей среды здания выбирать наилучшие конструктивные и объемно-планировочные решения по показателю минимальных тепловых потерь здания.

Использование ИНС и алгоритмов МО в контексте энергоэффективности зданий позволяет создавать методы прогнозирования тепловых потерь с учетом широкого спектра входных параметров, включая метеорологические данные, теплоизоляционные характеристики материалов и данные объемно-планировочных решений здания. Эти методы обеспечивают возможность разработки моделей, способных прогнозировать тепловые потери с высокой

точностью, учитывать воздействие различных факторов на энергопотребление зданий, становящихся частью действенного и эффективного инструментария управления жизненным циклом объекта строительства.

Работа выполнена в рамках проекта №Пр-10/22 программы развития БГТУ им. В.Г. Шухова «Приоритет 2030» на 2021-2030 гг. совместно с лабораторией проектирования конструкций Университета Дияла (Ирак) в рамках Меморандума о сотрудничестве между университетами.

Степень разработанности темы. В отечественной и зарубежной литературе проведенные исследования достаточно подробно рассматривают вопросы управления жизненным циклом объектов капитального строительства с позиции энергоэффективности, включая работы Н.В. Голубцова, Л.А. Опариной, Л.А. Сулеймановой, Д.В. Топчего, В.О. Чулкова, С.Г. Шеиной, M. Teni, C.R. Iddon, A.M. Moncaster, A. Takano и других ученых. Большое внимание уделяется повышению энергоэффективности зданий на этапе проектирования. Над разработкой теоретических и практических основ повышения энергоэффективности зданий работали: В.Н. Богословский, С.В. Корниенко, Ю.А. Табунщиков, О. Фангер, Y. Cheng, J. Nin, A. Alajmi, F. Miranville, G. M. Revel, E. Sabbatini и другие ученые. Многочисленные исследования, направленные на поиск путей повышения функционального применения энергоэффективных ограждающих конструкций зданий, выявили значительные успехи в применении газобетонных блоков в качестве стенового материала. Научно-теоретические и практические аспекты нейросетевого моделирования и обучения, инструментами предиктивной аналитики при решении технических и технологических задачах производственных отраслей экономики рассматривались в работах Р.А. Богдановой, В.В. Камашева, В.И. Кленина, A.S. Ahmad, T.Y. Deo, T. Hastie, Sh. Ma, C. Qu и других ученых.

Цель работы. Разработка научно обоснованной технологии анализа, ранжирования и количественной оценки эффективности вариантно

проектируемых технических решений ограждающих конструкций, обеспечивающей рациональное управление жизненным циклом объекта строительства по показателю минимизации прогнозируемых нейросетью тепловых потерь здания.

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

- исследование состояния проблемы и современных научных подходов в управлении жизненным циклом объектов капитального строительства с позиции энергосбережения и повышения энергетической эффективности;

- формирование набора данных о зданиях с прогнозируемыми теплопотерями, включая прямые и приведенные конструктивные и объемно-планировочные характеристики, метеорологические сведения, теплотехнические характеристики материалов и изделий, используемых при строительстве и эксплуатации объекта;

- обоснование параметров, разработка и обучение модели ИНС и МО, обеспечивающих прогнозирование тепловых потерь здания и ранжирование конструктивных решений по степени влияния на общие теплопотери объекта строительства с последующей оценкой эффективности мероприятий по их оптимизации;

- разработка, экспериментальное и численное конструктивное и энергетическое исследование вариантов технического решения элементов ограждения здания, обеспечивающих вариантное проектирование ограждающих конструкций по критерию минимизации тепловых потерь объекта на его жизненном цикле;

- разработка научно-теоретических основ технологии управления жизненным циклом объектов капитального строительства, базирующейся на нейросетевом прогнозировании теплопотерь формализованной по прямым и приведенным конструктивным и объемно-планировочным характеристикам

модели здания, обеспечивающем оптимизацию конструктивных решений объекта, улучшающих его теплотехнические характеристики.

Объектом диссертационного исследования являются здания и сооружения, в отношении которых осуществляется оценка, исследование и повышение тепловой защищенности.

Предметом диссертационного исследования являются теплопотери объекта строительства, минимизируемые рациональными техническими решениями ограждающих конструкций на этапе проектирования.

Научная новизна работы. Обосновано и экспериментально подтверждено организационно-техническое решение, заключающееся в совершенствовании механизмов управления жизненным циклом объектов капитального строительства с разработкой моделей искусственных нейронных сетей и машинного обучения, позволяющее осуществлять прогнозирование теплопотерь здания и оценку влияния на них входных параметров, включая метеорологические данные, теплоизоляционные характеристики материалов, данные объемно-планировочных и конструктивных решений объектов капитального строительства.

Обоснованы параметры и разработаны модели ИНС и алгоритма МО для оценки и прогнозирования тепловых потерь через ограждающие конструкции здания, позволяющие установить количественное влияние конструктивных и объемно-планировочных решений здания на прогнозируемые теплопотери.

Предложен механизм оптимизации модели ИНС посредством оценки влияния входных параметров набора данных на прогнозируемые теплопотери и определения коррекционных коэффициентов.

Разработаны научно-теоретические основы технологии управления жизненным циклом объектов капитального строительства, базирующейся на нейросетевом прогнозировании, тепловых потерях здания и предложении рациональных технических решений по минимизации теплопотерь.

Теоретическая и практическая значимость работы. Дополнены теоретические представления о возможности применения искусственных нейронных сетей и метода машинного обучения для прогнозирования тепловых потерь здания с учетом его конструктивных, объемно-планировочных решений и климатических показателей.

Обоснована и экспериментально подтверждена целесообразность и эффективность применения составных перемычек из газобетонных блоков в качестве рациональных технических решений ограждающих конструкций зданий, обеспечивающих прогнозируемое снижение теплопотерь здания на 13-25 % за счет отсутствия теплопроводных включений в виде арматурного каркаса и тяжелого бетона при требуемой механической обеспеченности.

Методология и методы исследования. Теоретической и методологической основой данной работы служат результаты фундаментальных и прикладных исследований в области энергоэффективности зданий. При разработке исследовательского подхода и проведении экспериментальных исследований применялись современные методы системного анализа, математического моделирования и статистической обработки данных. Одним из элементов методологии является учет международных баз данных по энергоэффективности строительных материалов и процессов в контексте их применения на различных этапах жизненного цикла. Эмпирическая база исследований формировалась с использованием результатов мировых научных исследований в области энергоэффективности строительных материалов и процессов, анализа технической документации и характеристик газобетонных конструкций для разработки и проверки моделей ИНС и МО, а также для основных тенденций и факторов, влияющих на тепловую защищенность объектов капитального строительства.

Положения, выносимые на защиту:

– научно-теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение эффективности технологии управления жизненным циклом объекта строительства, заключающееся в использовании моделей искусственных

нейронных сетей и машинного обучения для оценки, прогнозирования и минимизации рациональными техническими решениями теплотерь здания, зависящих от конструктивных, объемно-планировочных показателей, теплоизоляционных характеристик материалов, включая метеорологические данные;

– результаты обоснования параметров, разработки и обучения моделей ИНС и МО для прогнозирования тепловых потерь через ограждающие конструкции, позволяющие установить влияние конструктивных и объемно-планировочных решений здания и климатических показателей на прогнозируемые выходные данные;

– механизм оптимизации модели ИНС посредством оценки влияния входных параметров набора данных на прогнозируемые теплотери и определения коррекционных коэффициентов;

– результаты численных и экспериментальных исследований прочностных и теплозащитных характеристик разработанных составных перемычек из газобетонных блоков со стержневым и внешним полосовым армированием, обеспечивающие рациональное вариантное проектирование ограждающих конструкций здания повышенной тепловой защищенности;

– результаты прогнозирования теплотерь здания и их количественные зависимости от конструктивных и объемно-планировочных характеристик объекта строительства, обеспечивающие выбор и экономическое обоснование его эффективных конструктивных решений.

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

Апробация научно-исследовательской работы. Основные положения диссертационной работы исследований докладывались и обсуждались на: XIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и научно-технический прогресс» (Старый Оскол, 2020); V Международной научно-практической конференции «Наука и инновации в строительстве» (Белгород, 2021); The Third International Scientific Conference of Engineering Sciences (Баакуба, 2023); Международной научно-практической конференции «Наукоемкие технологии и инновации» (Белгород, 2023); XV Международном молодежном форуме «Образование. Наука. Производство» (Белгород, 2023); VIII Международном студенческом строительном форуме (Белгород, 2023); VIII Всероссийской научно-практической конференции «Инженерное дело на Дальнем Востоке России» (Владивосток, 2024).

Внедрение результатов исследований. Результаты исследований апробированы в производственных условиях на предприятии по производству изделий из автоклавного газобетона «Assad Babel For Building Technology» (г. Бавилон, Ирак), где была выпущена партия составных перемычек из газобетонных блоков с внешним полосовым и стержневым армированием; на предприятии «Factory for production lightweight blocks» при строительстве многоквартирного дома (г. Аль-Рамади, Ирак), где были проведены работы по установке составных перемычек в наружных стенах из газобетонных блоков, выбранных на основе нейросетевого прогнозирования теплопотерь.

Имеются акты о внедрении результатов диссертационной работы следующих предприятий:

– Завод по производству изделий из автоклавного газобетона «Assad Babel For Building Technology» (г. Бавилон, Ирак) по выпуску партии составных перемычек из газобетонных блоков;

– «Factory for production lightweight blocks» (г. Аль-Рамади, Ирак) по установке составных газобетонных перемычек над оконными проемами в

наружных стенах из газобетонных блоков, выбранных на основе нейросетевого прогнозирования теплопотерь.

Теоретические и экспериментальные положения диссертационной работы используются в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистрантов по направлению «Строительство».

Публикации. Основные положения работы изложены в 22 публикациях, в том числе: 5 статей в российских журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК РФ; 3 статьи в изданиях, индексируемых в базе данных Scopus. Получены 3 патента РФ на полезную модель, свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023681552 и свидетельство о государственной регистрации Базы данных № 2023623566.

Личный вклад. Личный вклад заключается в активном участии во всех этапах исследования, включая сбор, анализ и систематизацию теоретических данных, личном проведении всех экспериментов, их подготовке и анализе результатов, самостоятельном формулировании положений, которые были представлены на защите, отражая основные результаты и выводы, подчеркивающие научную новизну и теоретическую и практическую значимость работы, выполнение диссертантом комплекса экспериментальных исследований, последующую обработку и анализ полученных данных.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, приложений. Результаты изложены на 191 странице машинописного текста, включающего 17 таблиц, 89 рисунков, список литературы из 155 источников, 10 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. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА

В условиях устойчивого развития территорий и интенсивного роста объемов строительства, выбор материалов и конструктивных решений для строительства зданий становится все более значимым. Особую важность приобретают эффективные строительные конструкции, которые играют ключевую роль на всех этапах жизненного цикла объекта капитального строительства, способствуя его устойчивому функционированию и сокращению ресурсозатрат.

Оценка эффективности строительных систем включает в себя более глубокий анализ их характеристик, таких как прочность, износостойкость, теплоизоляционные и звукоизоляционные свойства. Это важно для обеспечения комфортных условий проживания и работы в зданиях, а также для снижения энергопотребления и эксплуатационных расходов [1-5].

1.1. Существующие подходы к управлению и оценке жизненного цикла объектов капитального строительства

Методология управления жизненным циклом зданий, активно применяемая в последние десятилетия, является ключевым инструментом для устойчивого проектирования и управления. Ее основная цель заключается в количественной оценке и уменьшении негативного воздействия на окружающую среду и энергопотребления строительных систем [6-10]. В контексте структурного проектирования энергоэффективные стратегии включают не только оценку жизненного цикла, но и уменьшение использования материалов и производственной энергии, а также повышение скорости повторного использования структурных систем (рисунок 1.1) [11, 12].

Несмотря на активные усилия по проведению политики по энергосбережению и повышению энергоэффективности, в том числе в строительной отрасли, все еще остается множество нерешенных проблем. Существующая практика проектирования новых зданий определенного уровня

энергоэффективности или реконструкции зданий с целью повышения этого уровня не учитывает динамику жизненного цикла здания. Заказчик и проектировщик не проявляют интереса к снижению энергопотребления или повышению энергоэффективности своего здания, так как им не предоставляются соответствующие стимулы.

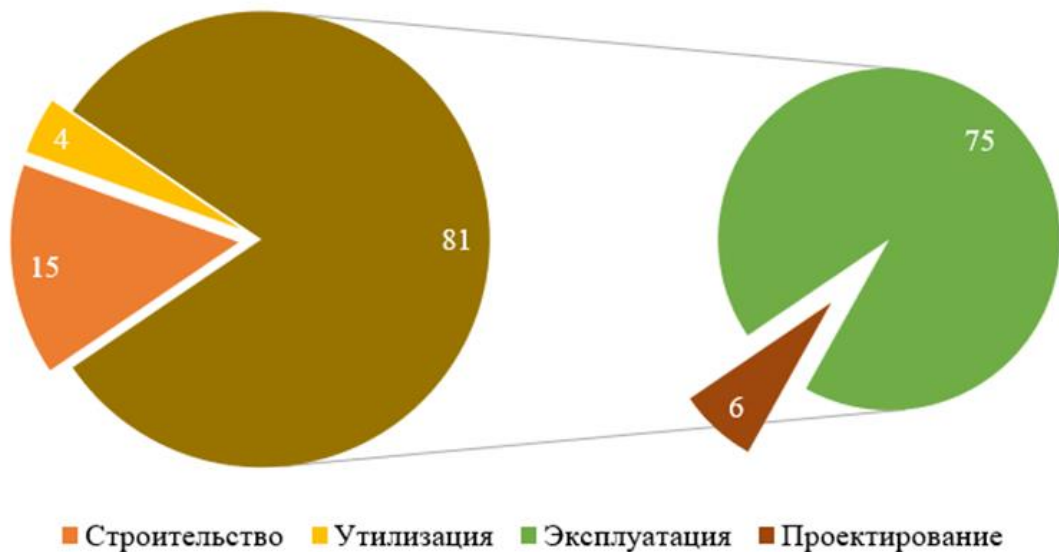


Рисунок 1.1 – Распределение энергетических затрат по этапам жизненного цикла здания

Организация строительной деятельности в стране не ориентирована на сохранение энергии. В настоящее время процесс организации строительного производства руководствуется нормативным документом СП 48.13330.2011 [13], который не содержит разделов, посвященных вопросам энергосбережения и энергоэффективности.

При возведении новых зданий не принимаются во внимание принципы устойчивого развития окружающей среды, согласно которым основой для гармоничного развития является разумный выбор между реконструкцией существующего здания или его сносом, с последующим строительством нового [14, 15].

Поэтому повышение уровня энергетической эффективности зданий и снижение их энергопотребления невозможны без признания того, что здание как

целостная энергетическая система представляет собой не просто сумму отдельных элементов, а особое сочетание, придающее всей системе новые качества, отсутствующие в каждом отдельном элементе [16].

Системный подход к энергоэффективности здания предполагает ее динамическую природу, изменяющуюся на протяжении всего жизненного цикла здания: от стадии инвестиционной концепции до вывода из эксплуатации. При разработке проектных решений необходимо учитывать, что общие энергетические затраты на строительство здания (включая затраты на добычу и переработку сырья, производство строительных материалов и полуфабрикатов, строительные-монтажные работы, транспорт, оборудование здания и прочее) могут значительно превышать затраты на эксплуатацию здания в виде энергии на отопление и освещение в течение всего срока его эксплуатации, а также затраты на утилизацию. Это может привести к отмене преимущества концепции энергоэффективности.

Поскольку нет единого универсального подхода, способного решить все проблемы устойчивых структурных систем, важно понимать взаимосвязи между материалами, компонентами и процессами в течение всего жизненного цикла здания. Это позволит эффективно справляться с национальными и глобальными экологическими проблемами, а также оптимизировать энергетический баланс между различными компонентами здания [17, 18]. Некоторые из проблем, с которыми сталкиваются инженеры-строители при внедрении устойчивых методологий, включают в себя сложность оценки жизненного цикла, ограниченные ресурсы и информация, а также необходимость соблюдения различных нормативных требований и стандартов. Уровни ограничения внедрения устойчивых методологий оценки жизненного цикла приведены на рисунке 1.2 [1, 19-22].



Рисунок 1.2 – Уровни ограничения внедрения устойчивых методологий оценки жизненного цикла

Ограниченное внедрение устойчивых экологических методов в строительных конструкциях часто обусловлено отсутствием надежных и удобных в использовании вычислительных средств [23, 24].

Информационное моделирование зданий (BIM) определяется как набор взаимодействующих политик, процессов и технологий, создающих методологию для управления ключевыми данными проектирования и проекта здания в цифровом формате на протяжении всего его жизненного цикла [1, 25]. BIM рассматривается как единая модель, предназначенная для хранения и передачи геометрических и пространственных отношений, географической информации, данных о количестве и характеристиках различных компонентов здания, сметы, запасов материалов и графиков проекта [26-30]. В строительных проектах, в которых участвуют несколько заинтересованных сторон, BIM может быть реализован для повышения совместимости информации и улучшения процедур принятия решений на этапах проектирования и строительства [26, 31, 32]. Кроме того, использование BIM может революционизировать способы интеграции моделей воздействия на окружающую среду и энергетики в строительные системы [33, 34].

BIM активно применяется как центральная платформа, обогащающая возможности проектировщиков в координации строительной документации, наблюдении за ходом строительства и эффективном управлении объектами на всех этапах их эксплуатации [34-36].

Научные исследования начались с разработки новых приложений BIM, предназначенных для решения ряда проблем, связанных с устойчивым развитием. Эти приложения помогают оценить воздействие на окружающую среду, управлять отходами, давать рекомендации по экологическому проектированию и разрабатывать стратегии для сокращения выбросов углекислого газа как в существующем, так и в будущем строительном секторе [37, 47]. Однако для максимизации экологических и энергетических выгод на разных этапах жизненного цикла зданий нужны дальнейшие исследования по интеграции BIM с устойчивыми стратегиями и зеленым строительством.

Традиционно главными факторами, которые препятствовали внедрению встроенных и устойчивых практик при принятии решений в строительстве структурных систем, считались недостаточные или неэффективные требования, связанные с устойчивой эксплуатацией таких систем, а также отсутствие ясности среди многих практикующих специалистов относительно энергетически эффективных строительных решений [39]. На практике участие инженеров-строителей в выборе стратегий устойчивого и энергоэффективного строительства часто не учитывается [40]. Другие факторы, которые ограничивают применение устойчивых методологий в практике проектирования конструкций, приведены на рисунке 1.3.

Методы оценки жизненного цикла были использованы в строительстве для принятия устойчивых и энергоэффективных решений путем изучения их окружающих экологических последствий. Методология оценки жизненного цикла состоит из четырех различных фаз, приведенных на рисунке 1.4.

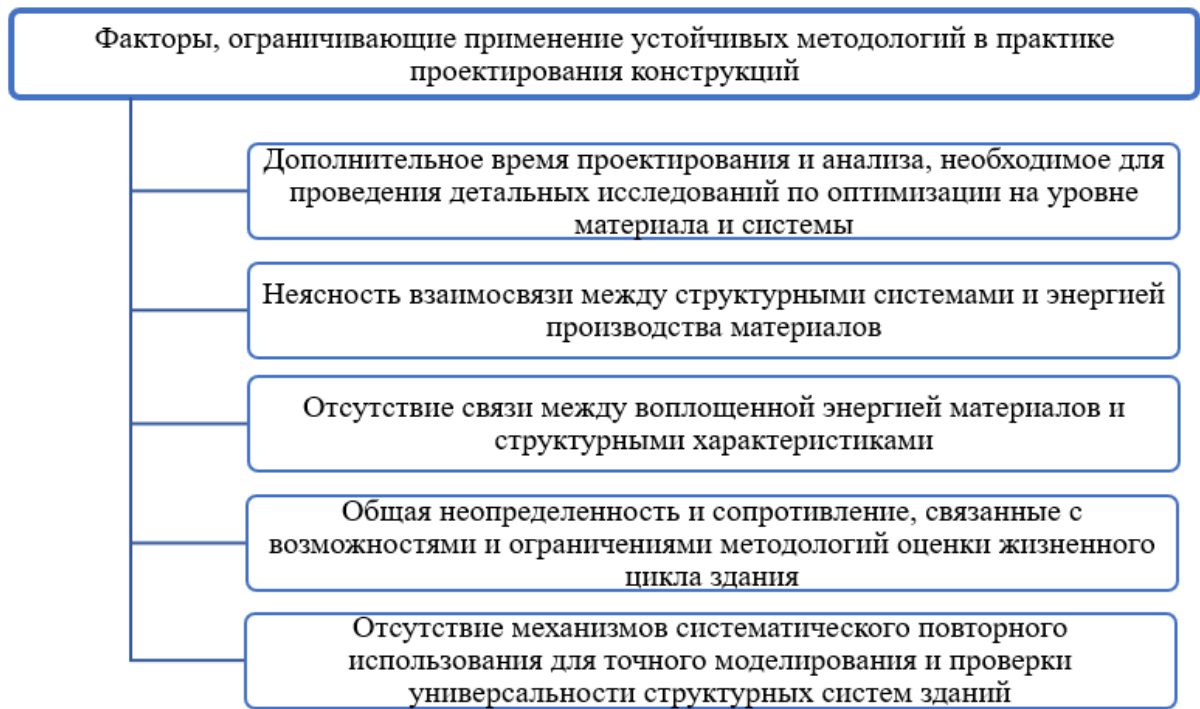


Рисунок 1.3 – Факторы, ограничивающие применение устойчивых методологий в практике проектирования конструкций

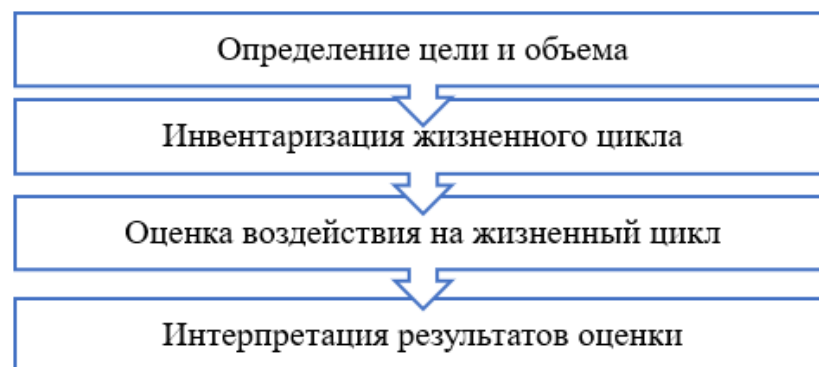


Рисунок 1.4 – Методология оценки жизненного цикла зданий

Оценка жизненного цикла (ОЖЦ) представляет собой аналитическую процедуру, которая количественно определяет потенциальное воздействие продуктов, процессов или систем на окружающую среду на протяжении всего их существования, включая этапы от добычи и производства сырья до эксплуатации и утилизации [48].

В зданиях энергоэффективные меры сосредотачиваются на экологических последствиях на всех этапах жизненного цикла: воплощенном, эксплуатационном и конечном. Воплощенный этап учитывает влияние процессов, связанных со

строительством здания, включая добычу материалов, их транспортировку на место и проведение строительных работ.

Эксплуатационный этап связан с эмиссиями энергии во время использования здания, а конечный этап включает в себя последствия, связанные со сносом, транспортировкой отходов на свалку и их переработкой или повторным использованием. ОЖЦ обладает значительным потенциалом для принятия энергоэффективных решений, особенно на ранних этапах проектирования, включая выбор материалов и систем, анализ альтернативного дизайна и разработку программы строительства [49-51].

Несмотря на то, что ОЖЦ может применяться как на уровне системы, так и на уровне здания, многие исследования сосредотачиваются на оценке только строительных и материальных компонентов здания, в то время как полный анализ жизненного цикла учитывает все его фазы, включая операционный этап [52].

Больше внимания уделяется энергетическим мерам, касающимся операционной фазы, поскольку решения, связанные с энергопотреблением в зданиях, усиливаются. Ранее исследования анализировали влияние различных строительных материалов на энергетическую эффективность, оставляя в стороне влияние других фаз жизненного цикла. Кроме того, отсутствует политика, регулирующая количество внедренных воздействий или других неоперационных воздействий здания. Однако переход к более строгим энергетическим политикам и зданиям с нулевым энергопотреблением предполагает, что улучшения в фазе внедренной энергии будут становиться все более значимыми по мере снижения операционной энергии зданий [53-59].

По мере того, как другие фазы жизненного цикла становятся более важными, возникает необходимость в систематическом анализе воздействий на этапах внедрения и эксплуатации, а также в оптимизации энергетических показателей внедренных воздействий. Таким образом, стандартизированные системы для

оценки окружающего воздействия строительных конструкций, которые учитывают различия между фазами внедрения и эксплуатации энергии, а также ограничения стратегий энергоэффективности, предложенных строительными инженерами, все еще находятся на стадии разработки.

1.2. Нормативно-правовая база управления жизненным циклом объектов капитального строительства

Цифровизация в строительстве включает в себя использование современных систем автоматизации, которые позволяют улучшить эффективность и точность выполнения задач на всех этапах проекта. Это могут быть системы мониторинга и управления, автоматизированные процессы строительства и сбора данных, а также интегрированные системы управления ресурсами и планирования [60, 61].

Цифровые технологии применяются в проектах создания «умных городов», где инфраструктура и объекты строительства оснащаются сенсорами, системами связи и управления, что позволяет оптимизировать использование ресурсов, повысить уровень комфорта и безопасности горожан, а также улучшить экологическую устойчивость городской среды.

Применение BIM в строительстве улучшает координацию между участниками проекта, сокращает количество ошибок и изменений на поздних стадиях строительства, а также обеспечивает возможность визуализации и анализа различных аспектов проекта [62].

Внедрение цифровых технологий в строительство приносит ряд положительных результатов. В частности, это сокращение времени, затраченного на выполнение проекта, оптимизация использования материальных ресурсов, снижение трудозатрат и улучшение качества проектирования и строительства. Кроме того, цифровые модели объектов обладают высокой степенью мобильности и надежности, что позволяет участникам проекта эффективно

взаимодействовать независимо от местоположения и получать доступ к актуальной информации [63].

Постановление Правительства № 331 [64] является ключевым регулятивным актом, который вводит обязательное использование информационной модели в проектировании всех капитальных строек по федеральным и региональным заказам с 1 января 2022 г. Это постановление базируется на Постановлении Правительства РФ № 1431 [65], которое определяет состав материалов и общие правила формирования информационной модели.

Согласно указаниям правительства, целью данного регулирования является сделать отрасль строительства более прозрачной, счетной и контролируемой, что стимулирует развитие BIM-технологий в России. Однако, для того чтобы этот процесс был наиболее эффективным, необходимо принятие дополнительного постановления, которое бы регламентировало процедуру прохождения информационных моделей через органы государственной экспертизы и последующее получение разрешения на строительство.

Это дополнительное постановление сделает возможным для заказчиков уже на прединвестиционной стадии планировать разработку информационной модели объекта капитального строительства или городской территории. Таким образом, заказчики смогут внедрять BIM-технологии на более ранних этапах проекта, что способствует повышению эффективности, улучшению качества проектирования и уменьшению рисков.

В 2023 г. в Минстрое России представили Концепцию внедрения системы управления жизненным циклом объектов капитального строительства с использованием BIM-технологий [66], на основании которой правительство получило полномочия по дальнейшему нормативно-правовому регулированию в вопросах внедрения BIM-технологий, приведенному на рисунке 1.5.

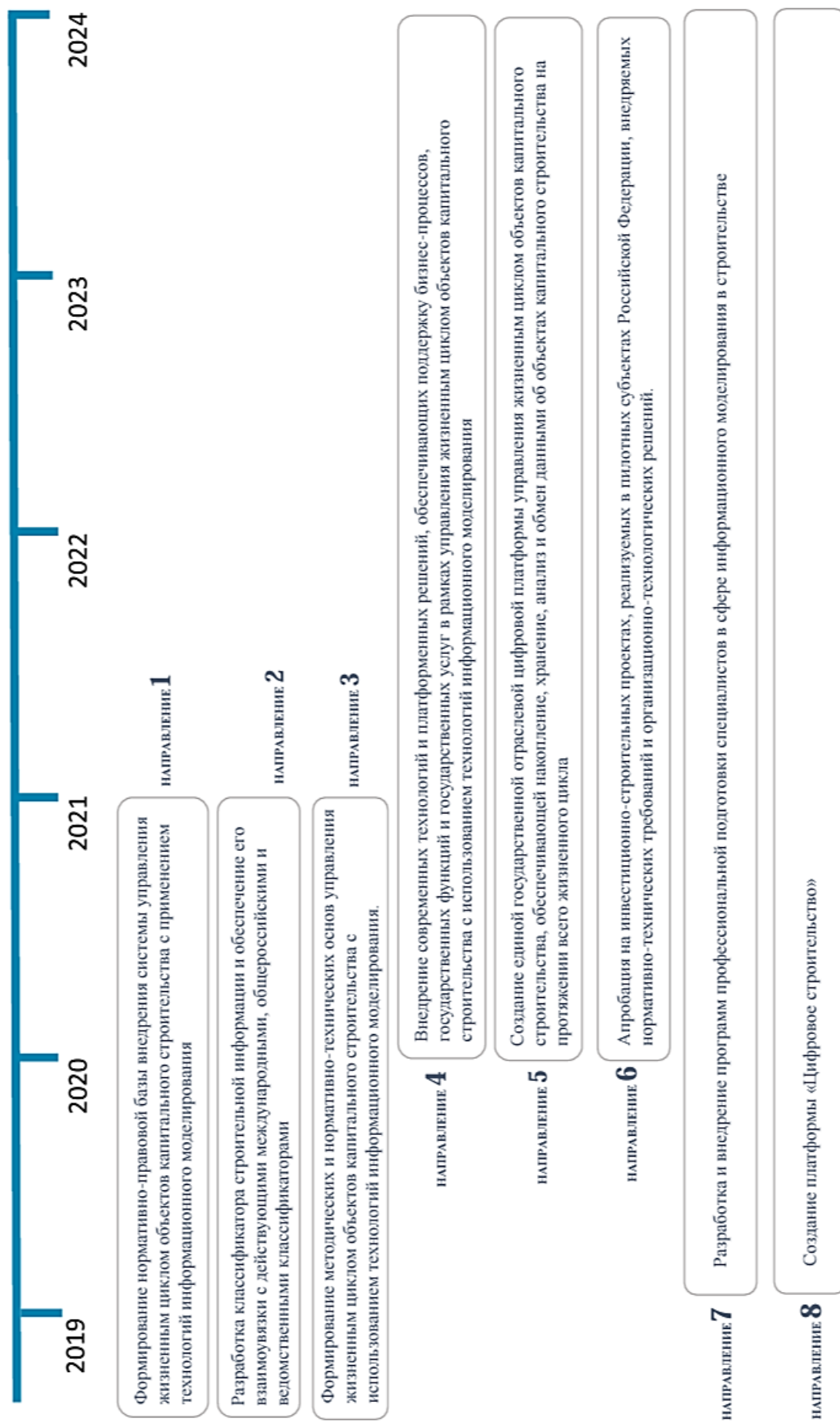


Рисунок 1.5 – Основные направления внедрения системы управления жизненным циклом объектов капитального строительства с использованием BIM-технологий

Управление жизненным циклом зданий в России регулируется рядом документов, приведенных в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Нормативные документы, регулирующие управление жизненным циклом зданий в России

Наименование документа	Назначение
1	2
ГОСТ Р 57310-2016 Моделирование информационное в строительстве. Руководство по доставке информации. Методология и формат (ISO 29481-1:2010)	Стандарт определяет методологию и формат для разработки руководства по доставке информации
ГОСТ Р 57563-2017 Моделирование информационное в строительстве. Основные положения по разработке стандартов информационного моделирования зданий и сооружений (ISO/TS 12911:2012)	Стандарт регламентирует процессы моделирования жизненного цикла систем защиты информации, включая идентификацию и анализ рисков, определение требований к системе защиты, проектирование, внедрение, эксплуатацию, мониторинг, анализ и совершенствование системы защиты информации в информационных системах
ГОСТ Р 57311-2016 Моделирование информационное в строительстве. Требования к эксплуатационной документации объектов завершеного строительства.	Стандарт устанавливает требования к эксплуатационной информационной модели объекта капитального строительства
ГОСТ Р 57309-2016 Руководящие принципы по библиотекам знаний и библиотекам объектов (ИСО 16354:2013)	Стандарт определяет требования к библиотекам знаний, определяет категории библиотек и закладывает основы единообразной структуры, их содержание и унификацию их использования.
ГОСТ Р ИСО 12006-2-2017 Системы управления строительством. Часть 2. Требования к управлению строительством при проектировании и разработке	Стандарт регламентирует требования к управлению строительными проектами на этапах проектирования и разработки
ГОСТ Р ИСО 12006-3-2017 Системы управления строительством. Часть 3. Требования к управлению строительством при производстве, монтаже и обслуживании)	Стандарт регламентирует требования к управлению строительными проектами на этапах производства, монтажа и обслуживания

1	2
ГОСТ Р ИСО 22263-2017 Системы менеджмента качества. Требования к органам, осуществляющим аудит и сертификацию систем менеджмента качества	Стандарт регламентирует требования к органам по сертификации систем менеджмента качества и органам, осуществляющим аудит данных систем
СП 328. 1325800.2017. Информационное моделирование в строительстве. Правила описания компонентов информационной модели	Документ содержит требования к компонентам информационных моделей зданий и сооружений, но не касается цифровых библиотек данных компонентов
СП 331. 1325800.2017. Информационное моделирование в строительстве. Правила обмена между информационными моделями объектов и моделями, используемыми в программных комплексах	Документ описывает базовые требования к созданию и эксплуатации информационных систем, взаимодействующих между собой в течение всего жизненного цикла здания или сооружения
СП 301. 1325800.2017. Информационное моделирование в строительстве. Правила организации работ производственно-техническими отделами	В документе рассматриваются принципы применения информационного моделирования при сооружении объекта для планирования, анализа и контроля производства строительно-монтажных работ, поставки материалов и оборудования, выполнения контрольных мероприятий и соблюдения техники безопасности

Первым шагом к реализации мер по повышению энергоэффективности в нашей стране стала «Энергетическая стратегия России до 2020 года», принятая в 1992 г. [67]. Согласно ей, приоритетными направлениями в области снижения энергоёмкости ВВП является привлечение интереса бизнеса к вопросам энергосбережения, а также создание условий для инвестирования в данную область. Помимо всего прочего стратегия предусматривает предоставление льготных условий для ведения бизнеса в сфере энергосбережения [16].

Основным законом в ресурсо- и энергосбережении в РФ является федеральный закон № 261-ФЗ, распространяющийся в том числе на строительную отрасль. В целом важные законы этого направления представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Федеральные законы о ресурсо- и энергосбережении в строительстве

Номер, год издания	Наименование	Краткая характеристика
№ 28-ФЗ от 04.1996	Об энергосбережении (утратил силу)	Регулирует отношения в сфере энергосбережения с целью создания условий для эффективного использования энергии
№ 184-ФЗ от 27.12.2002	О техническом регулировании	Устанавливает требования к продукции и связанным процессам на всех этапах их жизненного цикла как обязательные, так и на добровольной основе
№ 261-ФЗ от 23.11.2009	Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности, и о внесении изменений в отдельные законодательные акты РФ	Направлен на стимулирование энергосбережения и повышение энергетической эффективности через правовые, экономические и организационные меры
№ 384-ФЗ от 30.12.2009	Технический регламент о безопасности зданий и сооружений	Охватывает здания и сооружения всех типов, а также связанные с ними процессы проектирования, строительства, эксплуатации и утилизации

Опыт зарубежных стран, включая страны Европы и США, показывает, что государство играет ключевую роль в развитии BIM-технологий в строительной сфере. Введение соответствующих нормативных актов и поддержка со стороны государства способствуют более активному применению и распространению инновационных подходов в строительстве [68-72].

Нормативно-правовая база устанавливает стандарты и требования к энергоэффективности для различных типов зданий, таких как государственные здания, коммерческие объекты и жилые дома. Он также обязывает федеральные агентства и организации соблюдать эти стандарты при строительстве и реконструкции зданий. Также закон предусматривает различные меры поощрения для инвесторов и разработчиков, которые осуществляют энергоэффективные проекты. Это может включать налоговые льготы, кредиты, гранты и другие финансовые инструменты.

Законодательные акты также устанавливают программы исследований и разработок в области энергосбережения и энергоэффективности, направленные на

разработку новых технологий и методов, способствующих улучшению энергетической эффективности зданий. Управление жизненным циклом зданий в данных регионах регулируется на различных уровнях рядом документов, приведенных в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Нормативные документы и организации, регулирующие управление жизненным циклом зданий в США и странах Европы

Наименование документа	Назначение
США	
Energy Policy Act (EPAAct)	Федеральный законодательный акт, содержащий положения о повышении энергоэффективности и снижении энергопотребления зданий
International Energy Conservation Code (IECC)	Международный стандарт, принятый многими штатами США, устанавливающий требования к энергоэффективности зданий
Leadership in Energy and Environmental Design (LEED)	Программы сертификации зеленых зданий, разработанные US Green Building Council (USGBC)
American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE)	Разрабатывает стандарты и рекомендации по энергоэффективности и управлению жизненным циклом систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха, которая контролирует температуру, влажность и качество воздуха в зданиях и помещениях
National Institute of Building Sciences (NIBS)	Организация, разрабатывающая рекомендации и стандарты в области управления жизненным циклом зданий
Европа	
Европейская директива о энергоэффективности зданий (EPBD)	Законодательный акт, устанавливающий требования к энергоэффективности и экологической устойчивости зданий в странах-членах Европейского союза
EN 15232	Стандарт Европейского комитета по стандартизации, касающийся автоматизации и управления внутренней средой зданий с целью оптимизации энергопотребления
BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method)	Методика оценки экологической устойчивости зданий, широко используемая в Европе
Passive House Standard	Стандарт для проектирования и строительства пассивных домов, направленных на минимизацию энергопотребления
Европейский стандарт по энергетической производительности зданий (EPER)	Ряд стандартов, устанавливающих методы расчета и оценки энергопотребления и энергетической эффективности зданий

Таким образом, в России процесс внедрения технологий информационного моделирования в строительстве, базируясь на опыте зарубежных стран, имеет свою специфику, учитывая национальные особенности, степень развития отрасли, потребность в специалистах и т.д.

1.3. Методы управления энергоэффективностью объектов капитального строительства в течение их жизненного цикла

Жизненный цикл здания охватывает несколько ключевых этапов: проектирование, строительство, эксплуатацию, капитальный ремонт и утилизацию. С точки зрения энергопотребления наибольшее влияние имеют этапы эксплуатации, где расходуется до 90% энергии, а также производство строительных материалов и комплектующих (около 8%) и время строительства (около 2%) [15]. В жилищном строительстве решающее значение имеют этапы проектирования и строительства, поскольку их результаты сказываются на социально-экономическом воздействии на этапе эксплуатации здания.

Проектирование играет ключевую роль в решении задач энергосбережения в жилищном строительстве. Оно включает обработку информации о здании, разработку архитектурно-строительных концепций, выбор альтернативных вариантов проекта, оценку прогрессивности проектных решений и инвестиционных возможностей, а также преобразование всей информации в формат проекта. Энергосберегающие мероприятия на этапе проектирования проходят через концептуальную стадию, технико-экономическое обоснование и разработку архитектурно-строительного проекта.

Масштабы энергопотребления и потенциал энергосбережения на этапе эксплуатации здания требуют изменения подходов и методов проектирования. Решения, принятые на начальных этапах проектирования, определяют энергетические характеристики здания, поэтому важно применять функциональный подход к оценке энергосбережения и управлению им при проектировании, учитывая эксплуатационные требования.

При проектировании жилого дома определяются основные технико-экономические показатели, такие как сметная стоимость, продолжительность строительства, типы строительных материалов и конструкций, а также методы выполнения строительно-монтажных работ. Эти факторы влияют на уровень энергопотребления во время строительства и на энергетические и потребительские характеристики жилья, что в свою очередь определяет его рентабельность или убыточность в процессе эксплуатации.

Таким образом, на этапе проектирования определяется проектная энергоемкость как строительства, так и эксплуатации здания. Уровень проектной энергоемкости жилья зависит от требований заказчика, строительных норм и правил, опыта проектировщика, а также от использования архитектурных, строительных и инженерных мероприятий по энергосбережению. Основным критерием экономической оценки проектов строительства является не сокращение сметной стоимости и экономия материальных ресурсов, а высокое качество проектных решений, которые обеспечивают снижение затрат на содержание жилого фонда в процессе эксплуатации.

Одной из главных проблем в обеспечении энергосбережения на всех этапах жизненного цикла строительства является несбалансированность интересов всех участников процесса производства и потребления жилья. Дальнейшие исследования должны быть направлены на создание мотивационных механизмов для энергосбережения при строительстве жилых зданий и комплексов.

Теплозащитные свойства и энергоэффективность зданий оцениваются на основе обеспечения нормируемого энергопотребления здания. Концептуальный подход к нормированию энергоэффективности зданий опирается на теоретические разработки нескольких ученых. В частности, теория комфорта помещений зданий, разработанная В.Н. Богословским [73, 74] и О. Фангером [75, 76], а также теория рассмотрения здания как единой энергетической системы, разработанная Ю.А. Табунщиковым [77-80]. Такой подход соответствует

современным требованиям в области стандартизации теплозащиты зданий и разработки моделей энергетических стандартов.

Для оценки энергоэффективности зданий проводится анализ удельного энергопотребления, которое определяется национальными стандартами и зависит от множества факторов, таких как назначение здания, климатические условия, микроклимат помещений, а также экономические и политические аспекты. Удельное энергопотребление рассчитывается или измеряется с учетом теплофизических характеристик здания, его инженерных систем и расчетных условий. Энергоэффективность определяется путем сравнения расчетного и нормативного энергопотребления здания.

Существует несколько подходов к расчету энергопотребления зданий. Один из наиболее простых методов включает учет только теплотехнических характеристик оболочки здания. Этот подход основан на расчете теплопотерь через ограждающие конструкции и включает использование эффективных строительных материалов и улучшение конструктивных решений наружных ограждений. Хотя этот метод учитывает только теплопотери через оболочку здания, он все еще используется для комплексной оценки теплоизоляции зданий.

Более общим методом оценки энергопотребления здания является использование комплексного показателя, известного как эксплуатационная энергетическая характеристика [81]. Этот показатель включает расход тепловой и электрической энергии, необходимой для работы систем отопления, вентиляции, кондиционирования, а также для обеспечения горячего водоснабжения в течение года эксплуатации здания. Использование такого подхода позволяет получить более полную информацию о затратах и экономии энергии.

В настоящее время этот метод внедрен в стандарт организаций СТО 17532043–001–2005 «Нормы теплотехнического проектирования ограждающих конструкций и оценки энергоэффективности зданий» [82] и широко используется для оценки энергоэффективности зданий. Таблица 1.4

предоставляет различные способы повышения энергоэффективности зданий и их количественную экспертную оценку.

Таблица 1.4 – Пути повышения энергоэффективности зданий

Пути повышения энергоэффективности	Меры по экономии энергии	Уменьшение затрат энергии, %
Улучшение планировки и объемно-пространственных решений здания	Оптимальная ориентация здания с учетом направления ветра и солнечной инсоляции, увеличение компактности здания, разделение входных тамбуров	3-5
Использование ограждающих конструкций с повышенной теплоизоляцией	Дополнительное утепление внешних стен, герметизация проемов, применение энергоэффективных стеклопакетов	1-15
Увеличение эффективности систем отопления, вентиляции, горячего водоснабжения и канализации	Установка теплосчетчиков в тепловых узлах, использование термостатов на радиаторах отопления, применение систем вытяжной вентиляции с рекуперацией тепла, индивидуальный учет потребления воды в каждой квартире, разделение сточных и фекальных вод с восстановлением тепла при помощи тепловых насосов	2-10
Использование возобновляемых природных источников энергии	Использование альтернативных источников энергии, таких как солнечная энергия для обогрева и освещения зданий, использование тепловых насосов для преобразования энергии рек и ветра в электроэнергию	1-5
Совершенствование методов теплотехнического проектирования зданий	Применение современных методов проектирования, основанных на использовании компьютерных технологий	2-10

Множество исследований сосредоточены на снижении энергопотребления зданий [83-95]. Было показано, что одним из самых эффективных решений как для строительства, так и для реновации, является увеличение теплоизоляции ограждающих конструкций [96, 97]. В этом контексте важно оценивать тепловые характеристики зданий. Оценка этих характеристик обычно основывается на теоретических расчетах и иногда на численных симуляциях. Когда проводятся измерения на месте, результаты часто не соответствуют прогнозам. Это так

называемая «проблема разрыва в производительности». Несоответствие между теорией и практикой может иметь различные причины, такие как различие в свойствах материалов, старение, мосты холода, влажность и качество строительства [98].

Для корректного решения проблем, связанных с «проблемой разрыва в производительности», знание общих потерь энергии здания недостаточно. Скорее, требуется оценка местных тепловых характеристик каждого элемента здания (стены, крыши, окна и т. д.). Для точного энергоаудита здания необходима оценка теплопроводности стен или теплового сопротивления. Существующие стандартизированные методы основаны на стационарных предположениях. Они обычно требуют очень длительных измерений и чрезвычайно чувствительны к внешним условиям. Также были разработаны несколько динамических и активных методов [97]. Они обычно устойчивы к внешним условиям. Однако у этих методов также есть свои ограничения, которые должны быть устранены для более широкого использования измерений на месте строительной индустрией. Продолжительность проведения измерений на месте часто признается основным вызовом.

1.4. Анализ методов прогнозирования при управлении жизненным циклом объектов капитального строительства

Прогноз представляет собой систему научно обоснованных представлений о возможных состояниях объекта в будущем и альтернативных путях его развития. Он выражает предвидение на уровне конкретно-прикладной теории. В то же время прогноз носит вероятностный и многовариантный характер, т.е. не является однозначным. Процесс разработки прогноза называется прогнозированием [99].

Методы прогнозирования – это совокупность приемов и способов мышления, которые позволяют на основе анализа ретроспективных данных, а также экзогенных (внешних) и эндогенных (внутренних) связей объекта прогнозирования и их измерений в рамках рассматриваемого явления или

процесса, делать выводы определенной достоверности относительно его будущего развития.

В настоящее время ученые оценивают количество различных методов прогнозирования на более чем 150. Однако на практике основными считаются примерно 15-20 из них. Многие из этих методов скорее представляют собой отдельные приемы и процедуры, которые учитывают особенности объекта прогнозирования. Другие методы являются набором отдельных приемов, которые либо отличаются от основных, либо различаются между собой по количеству частных приемов и порядку их применения.

Существует несколько классификационных принципов методов прогнозирования, представленных в литературе. Один из самых важных - это степень формализации методов. Этот принцип достаточно полно описывает различные методы прогнозирования исходя из их уровня формальной математической обоснованности и строгости. Другим классификационным признаком может служить общий принцип действия методов прогнозирования, который описывает, каким образом методы осуществляют прогнозы и как они учитывают взаимосвязи и зависимости между различными переменными. Третьим классификационным признаком может быть способ получения прогнозной информации, который описывает, каким образом данные анализируются и какие методы используются для получения прогностических выводов.

Научно обоснованная классификация методов прогнозирования позволяет увеличить разнообразие методик и их модификаций на более детальных уровнях классификации, что способствует включению новых элементов и улучшению адаптации методов к различным ситуациям. По степени формализации, первому классификационному признаку, методы экономического прогнозирования делятся на две основные категории: интуитивные и формализованные.

Интуитивные методы прогнозирования применяются в ситуациях, когда сложность объекта прогнозирования делает невозможным учет влияния

множества факторов. В таких случаях используются оценки экспертов, которые могут быть как индивидуальными, основанными на мнении одного эксперта, так и коллективными, учитывающими мнение группы экспертов [100].

Индивидуальные экспертные оценки включают различные методы, такие как метод «интервью», аналитический метод и метод написания сценария.

Метод «интервью» предполагает прямой контакт эксперта с субъектом, который обычно является специалистом в определенной области. Эксперту предъявляются вопросы, и он отвечает на них, обычно в форме диалога «вопрос-ответ». В результате такого интервью собирается информация и экспертные оценки.

Аналитический метод включает логический анализ прогнозируемой ситуации. Эксперт проводит анализ данных и факторов, влияющих на ситуацию, и составляет аналитические докладные записки, в которых описываются его выводы и прогнозы.

Метод написания сценария основан на разработке различных сценариев развития событий. Эксперт определяет логику процесса или явления во времени при различных условиях и создает сценарии, описывающие возможные исходы и последствия различных ситуаций [99].

Методы коллективных экспертных оценок включают ряд подходов, которые основаны на совместном мышлении и обсуждении:

Метод «комиссий». Этот метод предполагает сбор группы экспертов для обсуждения и принятия совместного решения. Эксперты встречаются и делятся своими знаниями и мнениями, чтобы прийти к консенсусу.

Коллективная генерация идей (или «мозговая атака»). Этот метод способствует массовому и быстрому созданию идей. Группа участников генерирует идеи без критики или оценки, чтобы стимулировать творческое мышление и расширить возможные варианты решений.

Метод «Дельфи». Этот метод используется для прогнозирования или принятия решений с помощью экспертов. Эксперты высказывают свои мнения и

предсказания в несколько раундов, и их ответы анализируются и обсуждаются после каждого раунда, чтобы достичь консенсуса.

Матричный метод. Этот метод включает создание матрицы, где различные эксперты или параметры представлены в строках и столбцах. Это позволяет сравнивать и анализировать различные аспекты прогноза или решения.

Группа формализованных методов включает следующие подходы:

– экстраполяция: этот метод основан на предположении, что будущее поведение объекта может быть предсказано на основе его прошлого поведения. Методы, такие как наименьшие квадраты, экспоненциальное сглаживание и скользящие средние, используются для анализа временных рядов и прогнозирования будущих значений.

– моделирование: этот подход включает создание формальных моделей, которые описывают структуру и взаимосвязи между различными переменными или факторами. Это может включать структурное, сетевое и матричное моделирование, которые позволяют анализировать сложные системы и прогнозировать их поведение.

Рассмотренные классы интуитивных и формализованных методов делятся на две основные категории: экспертные и фактографические методы.

Фактографические методы основаны на фактической информации о прошлом развитии объекта прогнозирования. Эти методы используют доступные данные и статистику для предсказания будущих событий или трендов. Фактографические методы обычно не требуют специальных знаний экспертов, а полагаются на анализ существующих данных.

Экспертные методы базируются на мнениях и оценках экспертов, обладающих определенным опытом и знаниями в области прогнозирования. Экспертные методы включают методы эвристического прогнозирования, где используется продуктивно творческое мышление для анализа сложных проблем. Основной идеей метода эвристического прогнозирования является построение и

усечение «дерева поиска» экспертной оценки с использованием эвристических правил.

Метод эвристического прогнозирования является аналитическим методом, который применяется для прогнозирования научно-технических проблем и объектов, требующих высокой степени экспертного мнения из-за их сложности или неопределенности. Этот метод позволяет систематизировать и обрабатывать экспертные оценки, полученные из опросов квалифицированных специалистов, и применяется там, где формализованные подходы могут быть недостаточно эффективными или неприменимыми.

Конструктивная классификация методов прогнозирования основана на их структуре и позволяет систематизировать их в виде иерархического дерева с описанием каждого уровня по классификационным признакам.

Первый уровень классификации. На этом уровне методы прогнозирования делятся на три основных класса в зависимости от информационной основы, на которой они базируются:

- фактографические методы основаны на анализе фактической информации о прошлых событиях и развитии объекта прогнозирования. Эти методы используют исторические данные для предсказания будущих событий или трендов»

- комбинированные методы используют как фактографическую, так и экспертную информацию, комбинируя различные подходы для создания прогнозов»

- экспертные методы базируются на мнениях и оценках экспертов, специализирующихся в определенной области. Экспертные методы применяются там, где нет достаточной информации для использования фактографических методов, или когда требуется учет качественных аспектов.

Подуровни методов обработки информации. Классы экспертных и фактографических методов дополнительно подразделяются на подклассы в зависимости от методов обработки информации. Это может включать различные

аналитические, статистические, экспертные или комбинированные подходы к анализу данных и формированию прогнозов.

Экспертные методы прогнозирования могут быть классифицированы на два подкласса, каждый из которых имеет свои особенности:

Прямые экспертные оценки. Этот подкласс методов основан на получении и обработке независимых обобщенных мнений экспертов, либо на мнении одного эксперта. Особенностью прямых экспертных оценок является отсутствие влияния мнения одного эксперта на мнение другого или на мнение всей экспертной группы. В этом случае эксперты могут предоставлять свои индивидуальные оценки или мнения по заданному вопросу, и затем эти оценки обобщаются для получения консенсуса или среднего значения. Прямые экспертные оценки часто применяются в случаях, когда требуется собрать мнения экспертов без влияния на них мнения других участников или когда требуется получить объективную оценку отдельного эксперта.

Экспертные оценки с обратной связью. Этот подкласс методов реализует принцип обратной связи путем воздействия на оценку экспертной группы (или одного эксперта) мнениями, полученными ранее от этой же группы (или от одного из экспертов). В этом случае экспертам предоставляется обратная связь в виде результатов их собственных оценок или мнений, которые они могут использовать для корректировки своих будущих оценок. Экспертные оценки с обратной связью способствуют более точному и консистентному прогнозированию за счет учета предыдущих оценок и повышения осведомленности экспертов о контексте их оценок [100].

Класс фактографических методов прогнозирования объединяет три подкласса, каждый из которых имеет свои особенности:

Методы аналогий направлены на выявление сходства в закономерностях развития различных процессов. В этот подкласс входят методы математических и исторических аналогий. Методы математических аналогий используют объекты другой физической природы или из других областей науки и техники, которые

имеют математическое описание процесса развития, схожее с объектом прогнозирования. Эти методы помогают выявить закономерности, которые могут быть применены для прогнозирования будущего развития объекта.

Опережающие методы прогнозирования основаны на принципах специальной обработки научно-технической информации, учитывающей ее свойство опережать прогресс науки и техники. К ним относятся методы исследования динамики научно-технической информации, использующие анализ динамических рядов на базе различных видов такой информации для прогнозирования развития объекта. Сюда также можно отнести методы исследования и оценки уровня техники, которые используют методы анализа количественной и качественной научно-технической информации для определения характеристик уровня качества существующей и проектируемой техники.

Статистические методы представляют собой совокупность приемов обработки количественной информации об объекте прогнозирования с целью выявления математических закономерностей изменения его характеристик. Статистические методы помогают строить прогнозные модели на основе анализа исторических данных и выявления тенденций развития объекта [101].

Прогнозирование энергопотребления в зданиях становится все более важным элементом в системах управления энергопотреблением зданий (BEMS). Этот инструмент играет решающую роль в поддержке различных строительных приложений, таких как управление спросом (DSM), разработка интеллектуальных управляющих решений, балансировка спроса и предложения энергии, а также понимание поведения зданий и их оптимального функционирования в различных условиях. Энергетическая гибкость зданий становится ключевым аспектом для поддержки энергетической сети, особенно через обмен энергией и информацией между зданиями и интеллектуальной сетью.

В литературе по прогнозированию энергопотребления зданий выделяются три основных подхода к моделированию [102-107]:

Модели, основанные на физике или инженерии (модели белого ящика), используют физические характеристики зданий и параметры окружающей среды для оценки их энергопотребления.

Модели, управляемые данными (модели черного ящика), используют исторические данные для обучения машинного обучения, глубокого обучения или статистического анализа. Эти модели позволяют прогнозировать будущее энергопотребление зданий, используя данные об энергетической нагрузке, информацию об обитателях и метеорологические данные.

Подходы на основе данных широко применяются для прогнозирования энергопотребления зданий. Они используют исторические измерения энергопотребления, метеорологические данные и переменные индекса времени для создания прогностических моделей. Этот подход активно исследуется в различных областях, таких как образование, домашнее хозяйство и учреждения.

Важным этапом в использовании методов машинного обучения является оптимизация самой модели. Этот процесс, известный как настройка, играет важную роль в работе моделей машинного обучения, особенно если они сложные. Выбор неподходящих гиперпараметров может привести к низкой точности, что может быть ошибочно интерпретировано как неудача модели. Хотя правильный выбор входных переменных важен для успешного обучения модели, полностью воспользоваться преимуществами машинного обучения невозможно без настройки модели для конкретных обучающих данных. У каждого метода машинного обучения есть свои гиперпараметры, которые управляют процессом обучения. Одним из ключевых моментов при настройке параметров модели машинного обучения является ее обобщение, т.е. способность модели применяться к данным, которые не использовались во время обучения. Поэтому в процессе оптимизации модели необходим соответствующий механизм, такой как кросс-валидация, чтобы избежать переобучения (т.е. слишком хорошего соответствия обучающим данным).

Стандартный метод выбора оптимальных гиперпараметров – это поиск по сетке в сочетании с кросс-валидацией. При этом данные делятся на k исключительных подмножеств, и каждая комбинация параметров модели и архитектуры подгоняется к каждой отдельной группе из $k-1$ подмножества и тестируется на оставшемся подмножестве. Этот процесс позволяет оценить обобщенную применимость модели к различным частям данных. Кроме того, перед процессом обучения применяются различные нормализации данных, такие как стандартная, минимаксная и робастная, для обеспечения стабильности обучения модели [108, 109].

Нейронные сети широко применяются для оценки энергопотребления зданий и являются одними из важнейших методов машинного обучения в этой сфере. Они успешно применяются для моделирования сложных систем и решения нелинейных задач. Нейронные сети обладают способностью эффективно работать с различными методами и быть устойчивыми к помехам и шумам, при этом изучая ключевые закономерности систем [110].

Основная концепция нейронных сетей берет начало из области нейробиологии. Для различных приложений разработаны различные типы нейронных сетей, включая сеть прямой связи (FFN), сеть радиальных базисных функций (RBFN) и рекуррентные сети (RNN). Каждая из этих сетей состоит из нескольких слоев нейронов (как минимум двух) и функций активации, которые обеспечивают связь между нейронами. Среди часто используемых функций активации можно выделить линейные, сигмовидные и жесткие предельные функции.

В сети FFN информация передается от входных нейронов к выходным без циклов, двигаясь в одном направлении (рисунок 1.6). Сети RNN используют свою внутреннюю память для обучения на предыдущем опыте и могут иметь циклические связи. RNN существуют в различных архитектурах, включая полностью связные, рекуррентные, долгосрочную и краткосрочную память. Этот

тип сетей обычно используется для решения задач глубокого обучения, таких как прогнозирование временных рядов.

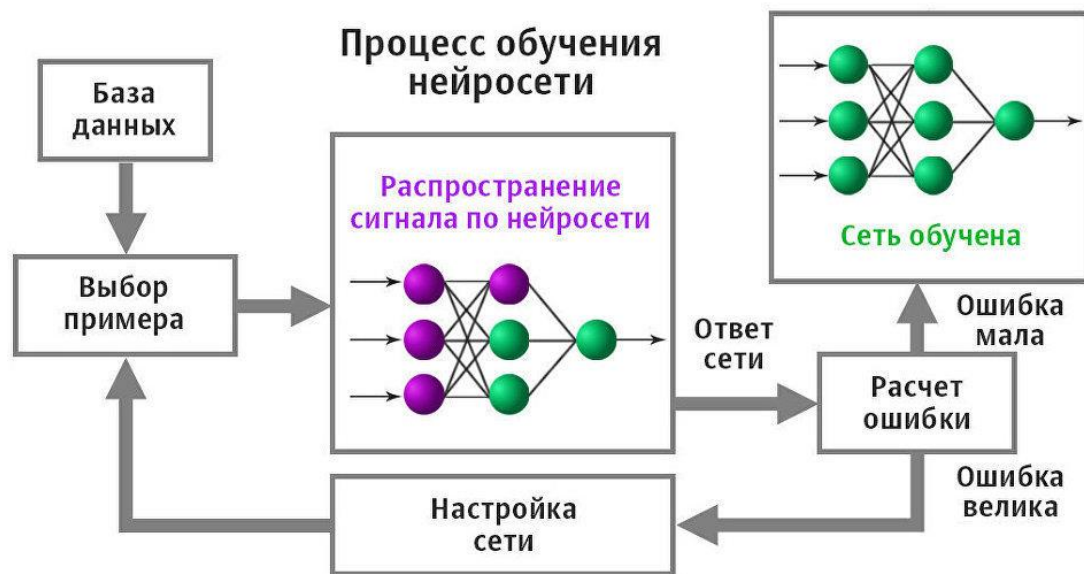


Рисунок 1.6 – Процесс обучения нейронной сети

Сеть RBFN использует радиальную базовую функцию в качестве функции активации, что делает ее эффективной для анализа временных рядов [111, 112].

Для обработки данных применяется многослойная сеть прямой связи FFN. Важные гиперпараметры нейронных сетей, подлежащие оптимизации, включают:

- оптимизатор: функция, обновляющая веса и смещения сети;
- функция активации: нелинейная функция, применяемая к входным данным перед передачей на следующий слой сети;
- начальная инициализация весов перед обучением;
- количество эпох: число проходов через все данные обучающего набора;
- размер пакета: количество примеров, обрабатываемых за одну эпоху;
- частота отсева: метод регуляризации, используемый для предотвращения переобучения путем случайного исключения некоторых нейронов во время обучения;
- количество нейронов и слоев в сети.

Машина опорных векторов (SVM) представляет собой надежные модели, используемые для решения нелинейных задач в исследованиях и промышленности, включая задачи регрессии и классификации. Они могут быть эффективно обучены даже на небольшом количестве обучающих данных, что делает их привлекательным выбором для моделирования в случаях, когда исторические данные отсутствуют (рисунок 1.7).

SVM основаны на принципе минимизации структурного риска, который направлен на уменьшение верхней границы ошибки обобщения, объединяющей ошибки обучения и уровень доверия модели. С помощью функций ядра SVM могут действовать как двухслойные нейронные сети, однако количество гиперпараметров у SVM обычно меньше. Еще одним преимуществом SVM является уникальность и глобальная оптимальность решения, которые достигаются без необходимости проведения сложной нелинейной оптимизации и риска застревания в локальных минимумах. Однако основным недостатком SVM является высокое время вычислений, которое обычно имеет кубическую сложность относительно размера обучающего набора данных [113].

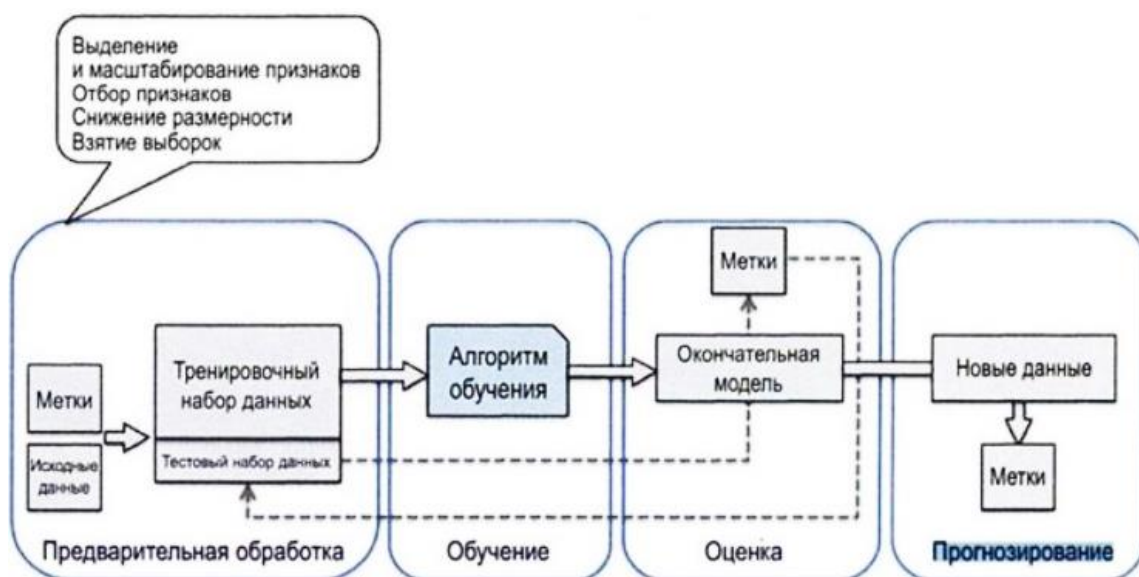


Рисунок 1.7 – Процесс машинного обучения

Случайный лес представляет собой ансамбль рандомизированных деревьев решений. Деревья решений (ДТ) – это модели машинного обучения, которые

представляют собой древовидные структуры. Они рекурсивно разделяют данные на более мелкие группы до тех пор, пока не достигнут листьев, каждый из которых представляет собой конечное значение. Поскольку точность ДТ сильно зависит от распределения данных, они могут быть нестабильными. Чтобы справиться с этой проблемой, случайный лес использует множество деревьев и усредняет их прогнозы. Этот метод называется ансамблированием. Суть случайного леса заключается в объединении отдельных моделей с похожей информацией для создания более надежной модели [114].

Основной параметр случайного леса – количество деревьев в ансамбле. Существует компромисс между точностью и временем обучения/прогнозирования, поэтому этот параметр нужно настраивать для достижения оптимального значения. Другие параметры включают количество признаков для рассмотрения при поиске наилучшего разделения, использование загрузочных выборок и минимальное количество данных для разделения узла.

Деревья регрессии с градиентным усилением (GBRT) также являются ансамблем, но с некоторыми отличиями от случайного леса. Они используют слабые ученики с высоким смещением и низкой дисперсией для создания более сложной модели. В GBRT каждое дерево зависит от предыдущих, и каждое новое дерево обучается на ошибках предыдущих. Важные параметры GBRT включают скорость обучения, количество деревьев, максимальную глубину дерева и количество признаков для разделения [115].

Чтобы оценить эффективность моделей, используются различные метрики, такие как коэффициент дисперсии, средняя ошибка смещения, среднеквадратическая ошибка и др. Эти метрики помогают оценить точность прогнозов модели относительно фактических данных.

Методы прогнозирования представляют собой разнообразные способы и приемы, которые используются для разработки и обоснования планов и прогнозов развития. В условиях современной экономики и управления все больше внимания

уделяется расширению и усовершенствованию методов прогнозирования. Это связано с необходимостью более точного предвидения будущих событий и явлений, чтобы принимать обоснованные решения и успешно управлять различными процессами.

Качество прогнозов играет ключевую роль в общественном развитии, поскольку на основе этих прогнозов формируются стратегии и принимаются решения, которые влияют на экономику, социальную сферу, политику и другие аспекты общественной жизни. Точные и надежные прогнозы позволяют эффективно планировать действия, адаптироваться к изменяющимся условиям и минимизировать риски.

1.5. Выводы по первой главе

1. Разработка методов оценки энергоэффективности строительных конструкций и их жизненного цикла играют ключевую роль в современном строительстве, особенно в контексте борьбы с изменением климата и уменьшения воздействия на окружающую среду.

2. Исследования в области теплопроводности стен зданий и их термоизоляции показывают, что активные методы измерений могут быть эффективны для определения тепловых характеристик строительных конструкций. Однако существует разрыв между теоретическими расчетами и практическими измерениями теплопроводности стен, что приводит к разрыву в производительности. Этот разрыв может быть вызван различными факторами, такими как различия в свойствах материалов, старение конструкции, теплопереходы и качество строительства. Для более точной оценки энергетической эффективности зданий необходимо проводить исследования, учитывая теплопроводность каждого элемента конструкции.

3. Анализ нормативно-правовой базы управления ЖЦ ОКС показал, что основная часть федеральных законов в области ресурсо- и энергосбережения

направлена именно на энергосбережение, а ресурсосбережение в России находится в стадии становления

4. Использование искусственных нейронных сетей и методов машинного обучения позволяет автоматизировать и оптимизировать процесс прогнозирования теплозащитных свойств конструкций, что сократит затраты времени и ресурсов на проведение подобных анализов. Это особенно актуально в условиях современной строительной индустрии, где требуется быстрая и точная оценка теплозащитных характеристик материалов и конструкций.

2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. Постановка цели и задач исследования

Анализ исследований, проведенных в первой главе диссертации, выявил, что управление жизненным циклом зданий в контексте их энергоэффективности требует учета большого количества конструктивных и эксплуатационных параметров, установленных в ходе инструментальных обследований. К числу наиболее значимых параметров, которые могут служить основой для прогнозирования изменения теплопотерь здания на этапе проектирования, относятся климатические показатели и конструктивные решения ограждающих конструкций здания.

Учитывая, что оценка энергоэффективности ограждающих конструкций традиционными аналитическими методами является чрезвычайно трудоемким процессом, к одним из наиболее оптимальным подходом для прогнозирования тепловых потерь следует отнести разработку моделей искусственных нейронных сетей и алгоритмов машинного обучения.

Для достижения поставленной цели необходимо было на основе имеющихся данных выбрать подходящий подход и определить показатели ограждающих конструкций, характеризующие их влияние на теплопотери здания.

Разработка моделей искусственных нейронных сетей (ИНС) и алгоритмов машинного обучения (МО) для прогнозирования теплопотерь в зданиях требует глубокого понимания структурных и эксплуатационных параметров, влияющих на энергоэффективность, куда входит выбор соответствующих показателей ограждающих конструкций, а также учет климатических факторов, таких как температура воздуха, относительная влажность и скорость ветра.

Использование моделей ИНС и алгоритмов МО потенциально может значительно повысить точность и эффективность прогнозирования теплопотерь в зданиях, что в конечном итоге может привести к более энергоэффективным проектным решениям и методам эксплуатации. Однако важно отметить, что разработка этих моделей требует значительного объема данных и

вычислительных ресурсов, а также тщательного процесса тестирования и проверки для обеспечения их точности и надежности.

Также с целью снижения теплопотерь через ограждающие конструкции разработана и испытана составная газобетонная перемычка для оконных и дверных проемов.

На рисунке 2.1 представлен план исследовательских работ по разработке методик и моделей для управления жизненным циклом зданий на этапе проектирования, выполняемых в данном исследовании.

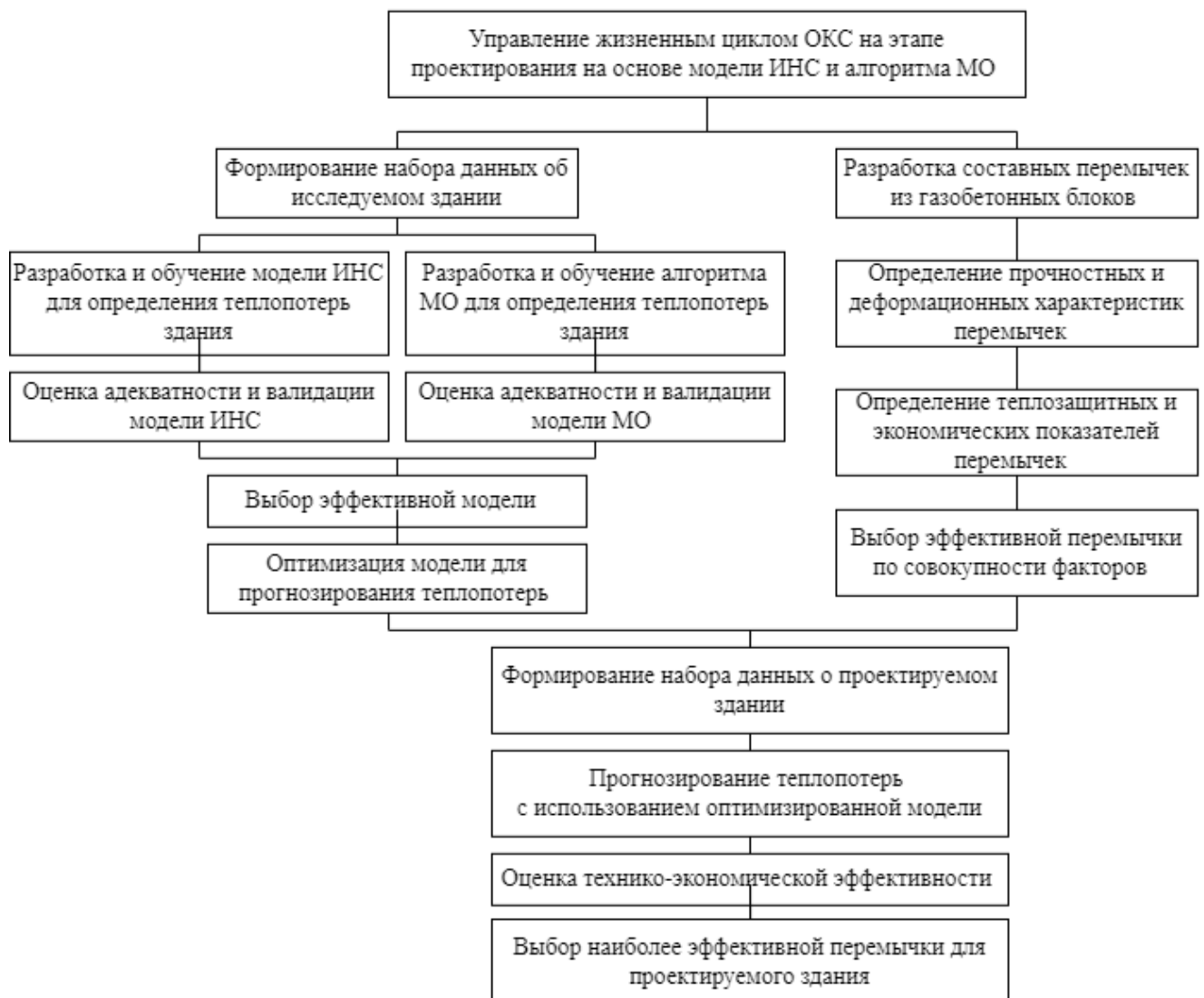


Рисунок 2.1 – Программа исследований по разработке методик и моделей для управления жизненным циклом зданий на этапе проектирования

2.2. Разработка структуры модели искусственной нейронной сети и алгоритма машинного обучения

Прогнозирование теплозащитных свойств зданий представляет собой активную область исследований, которая привлекает внимание благодаря своему потенциалу в повышении энергоэффективности в системах управления энергопотреблением зданий. Эта проблематика связана с прогнозированием временных рядов или регрессии в отношении энергопотребления зданий. В настоящее время методы, основанные на данных, становятся более привлекательными из-за их способности моделировать сложные взаимосвязи.

Прогнозирование теплозащитных свойств зданий требует учета различных факторов, таких как характеристики строительных материалов, архитектурные особенности здания, климатические условия и потребности в отоплении или охлаждении. Для этого применяются различные методы анализа данных, включая статистические модели, МО и ИНС.

Статистические методы могут использоваться для анализа и прогнозирования временных рядов потребления энергии на основе исторических данных о потреблении энергии и других факторов, влияющих на теплозащитные свойства здания. МО позволяет обнаружить сложные зависимости между различными параметрами и определить наиболее значимые факторы для прогнозирования. Искусственные нейронные сети предоставляют возможность моделировать нелинейные взаимосвязи и учитывать сложные паттерны потребления энергии.

В рамках исследования проведено прогнозирование тепловых потерь здания с наружными стенами из газобетонных блоков с использованием моделей ИНС и алгоритма МО. В качестве исходных данных были приняты следующие показатели:

1. Климатические показатели отопительного сезона в 2023 г. [116]:

- температура наружного воздуха (K_1);
- относительная влажность наружного воздуха (K_2);
- скорость ветра (K_3).

2. Конструктивные показатели:

- площадь стенового ограждения помещения (f_1);
- приведенное сопротивление теплопередаче стеновой конструкции (f_2);
- площадь перемычки (f_3);
- дополнительные удельные линейные потери через стык перемычки и стены (f_4);
- конструктивная плотность помещения (f_5);
- средняя высота этажа (f_6).

3. Характеристики объемно-планировочного решения помещений:

- коэффициент остекленности фасада (T_1);
- световой коэффициент (T_2);
- воздухопроницаемость помещения (T_3);
- ориентация конструкции (T_4);
- потери теплоты через ограждающие конструкции (T_5).

Температура наружного воздуха – температура окружающего воздуха, влияющая на теплообмен между зданием и окружающей средой.

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.

Площадь ограждающей конструкции помещения – площадь стены здания, отделяющих его от внешней среды, без учета площади остекления.

Приведенное сопротивление теплопередаче конструкции стены – это отношение разности температур на поверхностях ограждающей конструкции к плотности теплового потока через эту конструкцию.

Соотношение остекления к площади наружного ограждения помещения характеризуется коэффициентом остекленности фасада.

Соотношение остекления к площади помещения характеризуется световым коэффициентом.

Теплопроводность остекления – это отношение разности температур на поверхностях остекления к плотности теплового потока через данное остекление.

Воздухопроницаемость помещения – способность ограждающей конструкции здания пропускать воздух, что влияет на теплопотери и качество воздуха внутри помещения, характеризующийся кратностью воздухообмена при 50 Па.

Дополнительные удельные линейные потери – это дополнительные потери теплоты через линейную теплотехническую неоднородность, отнесённые к единице длины и одному градусу Цельсия.

Конструктивная плотность помещения определяется отношением суммарного объема стен помещения к его площади.

Средняя высота этажа – это вертикальное расстояние от уровня пола данного этажа до уровня пола вышележащего этажа.

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.

Теплопотери через ограждающие конструкции – количество тепла, теряемое через стены, крышу и пол здания, влияющее на энергопотребление и экономическую эффективность здания.

2.2.1. Разработка структуры модели искусственной нейронной сети

Конечная цель обучения нейронной сети заключается в том, чтобы научить сеть корректно отвечать на входные данные, т.е. делать правильные предсказания или классификации. Процесс обучения можно разбить на несколько этапов:

- подготовка данных – это один из самых важных этапов. Набор данных должен быть очищен от шума и несущественных факторов, а также разделен на обучающую, проверочную и тестовую выборки. Обучающая выборка используется для обучения модели, проверочная – для настройки гиперпараметров (например, скорости обучения) и оценки ее производительности в процессе обучения, а тестовая - для окончательной оценки производительности модели;

- инициализация параметров: нейронные сети начинают обучение с случайно установленными весами и смещениями (*bias*). Это начальные значения, которые затем будут постепенно корректироваться в процессе обучения;

- прямое распространение (*forward propagation*), во время которого входные данные перемещаются через сеть от входного слоя к выходному. На каждом слое сети происходит вычисление активации с помощью весов и функций активации. Это приводит к генерации выходных значений сети;

- расчет ошибки (*loss calculation*). После того как модель сделает предсказания, она сравнивает их с фактическими данными и вычисляет ошибку, которая показывает, насколько предсказания отличаются от правильных ответов;

- обратное распространение (*backpropagation*). После расчета ошибки алгоритм обратного распространения ошибки определяет, как изменить веса и смещения в сети, чтобы минимизировать эту ошибку. Это происходит путем вычисления градиентов функции потерь по отношению к каждому параметру сети и последующим обновлением весов в направлении, противоположном градиенту;

– оптимизация весов (weight optimization). Веса и смещения обновляются с использованием оптимизационного алгоритма, такого как стохастический градиентный спуск (SGD) или его модификации (например, Adam, RMSprop). Это позволяет модели постепенно улучшать свои предсказательные способности;

– повторение процесса. Все вышеперечисленные шаги повторяются многократно до тех пор, пока модель не достигнет удовлетворительной производительности на обучающем и проверочном наборах данных.

Схема обучения нейронной сети представлен на рисунке 2.2.



Рисунок 2.2 – Схема обучения нейронной сети

В вариационном ряде выделяют две основные категории признаков: средние значения и меры вариации (или рассеяния) [134-136].

Среднее арифметическое представляет собой количественную характеристику однородной группы данных, определяя обобщенные размеры

количественных признаков. Основными показателями средних значений являются среднее арифметическое, мода и медиана.

Среднее арифметическое $\bar{x}$ вычисляется по формуле:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (2.1)$$

где x_i – значения признака с порядковым номером i ($i = 1, n$); n – объем данных.

Мода Mo – это значение, которое наиболее часто встречается в наборе данных.

Медиана Me представляет собой значение, расположенное посередине вариационного ряда. Для нечетного числа вариантов ($n = 2m + 1$) это значение будет таким: x_{m+1} , для четного ($n = 2m$) – среднее между x_m и x_{m+1} .

Медиана широко применяется при анализе неравномерных распределений данных и менее чувствительна к выбросам по сравнению со средним арифметическим. Это делает ее более достоверной мерой центральной тенденции в данных, особенно в случае ассиметричных распределений.

Хотя средние значения дают общую картину о статистической группе, они не отражают, насколько точно они описывают это собрание данных.

Для измерения вариации значений признака используются другие показатели: размах вариации, дисперсия и среднее квадратическое отклонение.

Размах вариации R определяется по формуле:

$$R = x_{max} - x_{min}, \quad (2.2)$$

Размах вариации R рассчитывается просто, но является наиболее грубым показателем, поскольку учитывает только самые крайние значения признака, игнорируя все остальные [117].

Другие показатели, такие как дисперсия и среднее квадратическое отклонение, вычисляются на основе отклонений всех значений признака от его

среднего значения. Эти характеристики нашли широкое применение во многих областях математической статистики. Дисперсия σ^2 представляет абсолютную меру разброса значений признака относительно его среднего значения, выражая средний квадрат отклонений всех значений признака от его среднего значения [118, 119]. Для выражения меры вариации в тех же единицах, что и сам признак, применяется среднее квадратическое отклонение σ , представляющее собой корень из дисперсии

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}, \quad (2.3)$$

где x_i – варианта с порядковым номером i ; $\bar{x}$ – средняя арифметическая; n – объем совокупности.

Рассмотренные ранее меры рассеяния представляют собой абсолютные величины. Однако часто необходимо сравнить вариацию одного и того же признака между разными группами объектов, выявить степень отличий одного и того же признака внутри одной группы объектов в разные периоды, или сопоставить вариацию различных признаков внутри одних и тех же групп объектов. Для таких задач требуется использование относительных показателей, например, коэффициента вариации.

Коэффициент вариации V представляет собой отношение среднего квадратического отклонения к средней арифметической, выраженное в процентах:

$$V = \frac{\sigma}{\bar{x}} \cdot 100\%. \quad (2.4)$$

Распределение данных в нормальной форме зависит от двух параметров: среднего значения μ и стандартного отклонения σ . Его кривая описывается уравнением:

$$y = \frac{e^{-\frac{t^2}{2}}}{\sqrt{2\pi}}, \quad (2.5)$$

где t – нормализованное отклонение данных от среднего значения.

Главное свойство кривой нормального распределения заключается в том, что расстояние на горизонтальной оси распределения, измеренное в единицах стандартного отклонения от среднего значения, всегда остается постоянным (рисунок 2.3) [117].

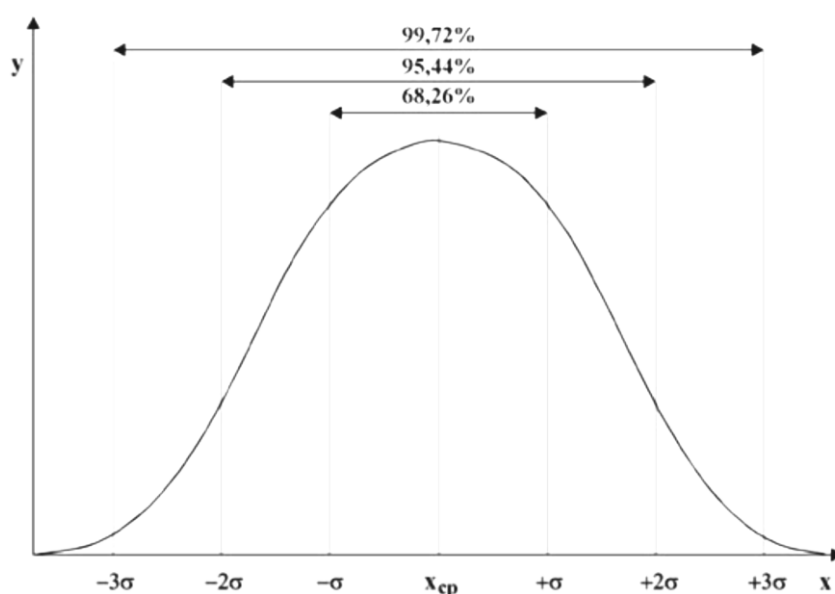


Рисунок 2.3 – Вид кривой нормального распределения

Соответствие гистограммы остатков с кривой нормального распределения позволяет оценить долю данных в генеральной совокупности с исследуемыми параметрами.

2.2.2. Теоретические основы разработки модели искусственной нейронной сети

Для разработки моделей искусственных нейронных сетей были выполнены следующие этапы:

1. Проведение экспериментальных исследований с целью получения данных об эксплуатационных показателях ограждающих конструкций.
2. Вычисление конструктивных показателей ограждающих конструкций.
3. Сбор данных о показателях средней температуры, относительной влажности наружного воздуха и скорости ветра.
4. Запись и подготовка базы данных.
5. Создание, обучение и тестирование разработанных моделей ИНС.
6. Отслеживание результатов и выбор лучшей структурной модели.
7. Определение тепловых потерь через ограждающие конструкции с использованием выбранных моделей ИНС.

Нейросетевое прогнозирование проводилось в программном комплексе Statistica.

В процессе обучения искусственной нейронной сети (ИНС) был применен метод многократных подвыборок с использованием 10 нейронов на внутреннем слое сети, как показано на рисунке 2.4.

База данных была разделена на три группы (рисунок 2.4):

Большой объем данных, используемый для обучения нейронной сети, составлял 70% от общего объема базы данных. Эти данные были случайным образом выбраны и использовались для обучения нейронных сетей.

Вторая группа данных, составляющая 15% от общего объема базы данных, использовалась для тестирования разработанной нейронной сети. Это позволяло оценить эффективность и точность модели на отдельном наборе данных.

Quick | Sampling (CNN and ANS) | **Subsampling** | Time series

Subsampling method

☒ Random

☐ Bootstrap

Size of subsamples (%)

Train subsample: 70

Test subsample: 15

Validation subsample: 15

Number of subsamples: 10

Seed for subsampling: 1000

OK

Cancel

Options

Set the test and/or validation sample fields to 0 to exclude these samples from the analysis.

MD handling (inputs)

☐ Casewise

☐ Mean substitution

SELECT CASES Case selection

Case weights

Рисунок 2.4 – Задание количества нейронных сетей при построении

Оставшиеся 15% данных были выделены в третью группу и использовались для оценки валидации разработанной нейронной сети. Это позволяло оценить производительность модели на независимом наборе данных и проверить ее способность к обобщению на новые данные.

В общей сложности было выполнено 2000 циклов (эпох) построения, как указано на рисунке 2.5. Это означает, что процесс обучения нейронных сетей был повторен 2000 раз для достижения оптимальной модели.

Выходные данные слоя подвыборки представляли собой массивы меньшего размера, что означает, что после каждой итерации процесса обучения данные проходили через слой подвыборки, где они обрабатывались и уменьшались в размере перед передачей в следующий этап обучения.

На рисунке 2.6 показана структура одной из созданных для обучения нейронных сетей.

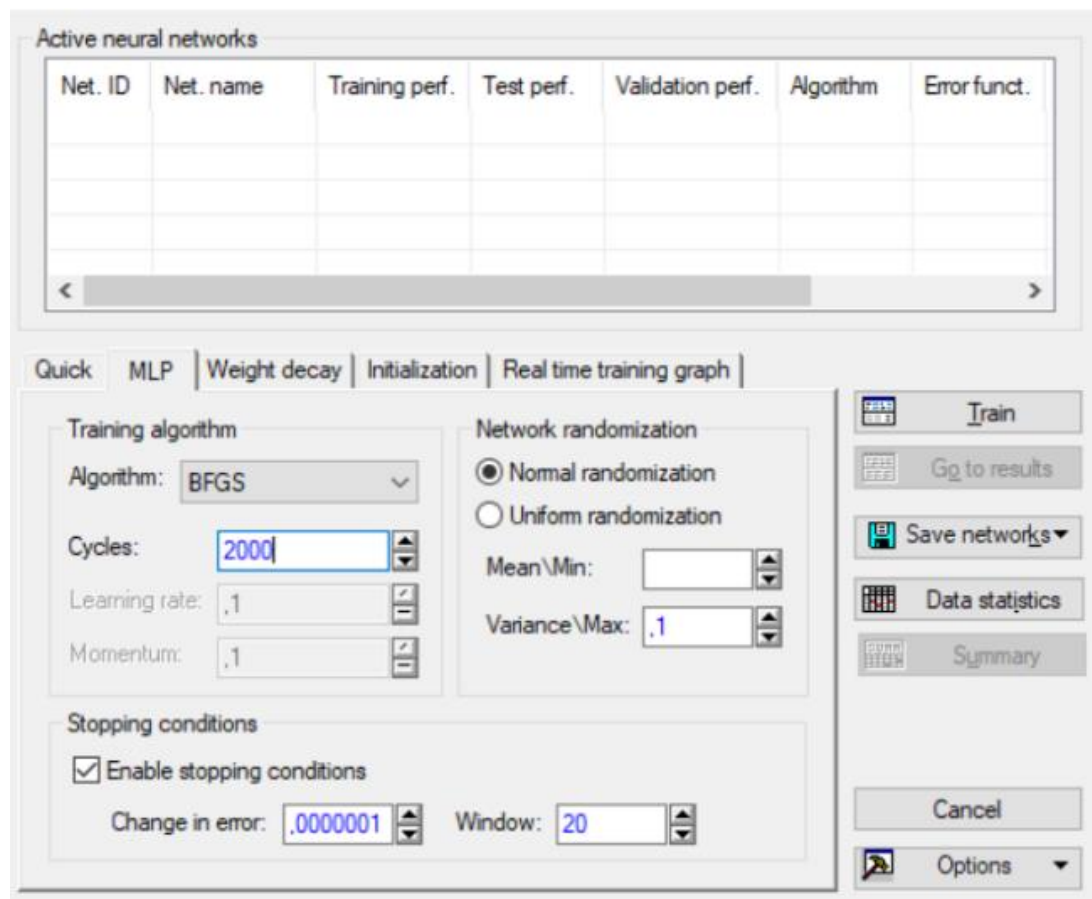


Рисунок 2.5 –Задание количества циклов построения

Входные данные

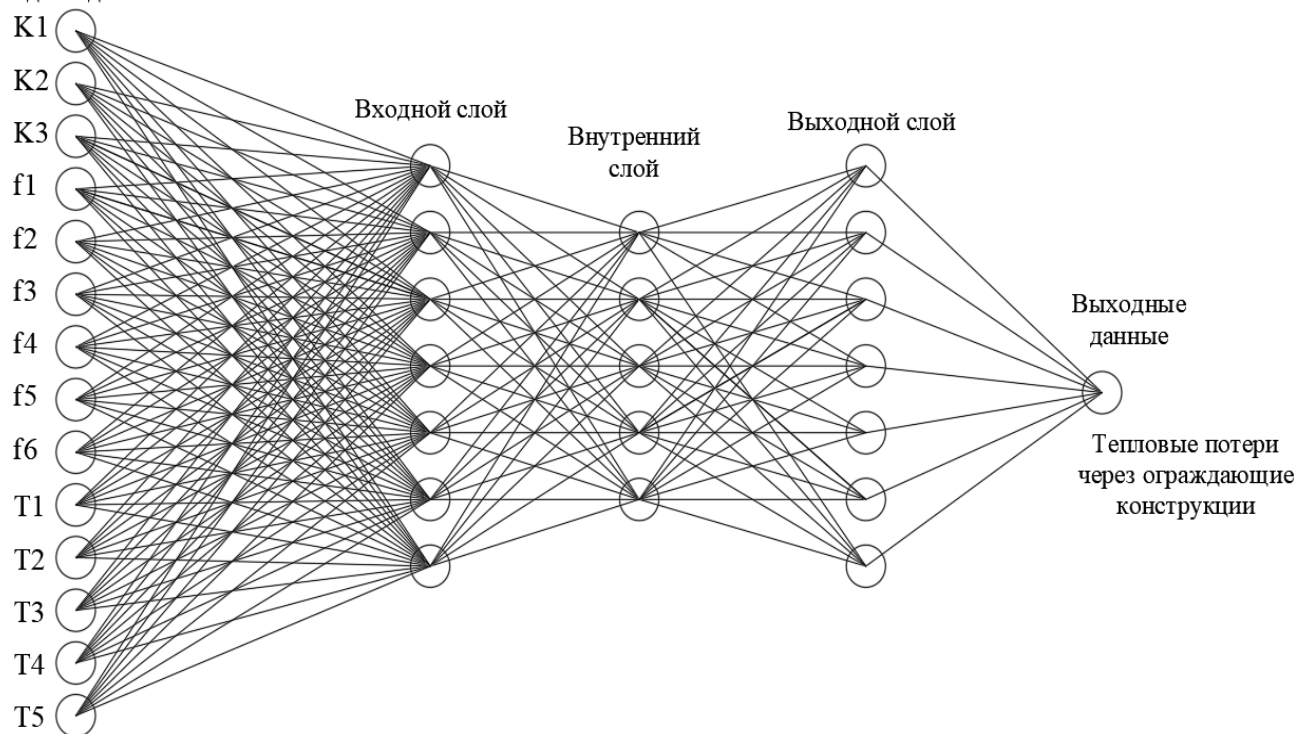


Рисунок 2.6 – Структура нейронной сети

Процесс обучения модели повторяется неоднократно с целью достижения оптимальной модели, которая наилучшим образом описывает зависимость между входными данными и ожидаемыми выходными данными.

В каждой итерации обучения модель адаптируется под предоставленные данные, корректируя свои параметры и веса, чтобы минимизировать ошибку прогнозирования. Этот процесс повторяется до тех пор, пока не будет достигнута заданная точность или до тех пор, пока не будет найдена модель с наилучшей производительностью.

Для оценки эффективности обученных моделей используется статистический анализ выходных данных. В качестве меры точности прогнозирования обычно используется средняя абсолютная ошибка (MAE), которая измеряет среднее абсолютное отклонение между прогнозируемыми значениями и фактическими данными. Сравнение MAE для различных обученных моделей позволяет выбрать наиболее эффективную модель для дальнейшего использования в прогнозировании.

2.2.3. Теоретические основы разработки алгоритма машинного обучения

В качестве инструмента для анализа для прогнозирования тепловых потерь через ограждающие конструкции здания возможно использование алгоритма машинного обучения на основе библиотеки `scikit-learn`, как наиболее доступная для использования и вариации исходных факторов. `Scikit-learn` – это библиотека машинного обучения для языка программирования Python.

Алгоритм машинного обучения, использующий библиотеку `scikit-learn`, проходит через несколько ключевых этапов.

Первым шагом является выбор подходящего алгоритма, что зависит от конкретного типа задачи, будь то классификация или регрессия, а также от особенностей данных. `Scikit-learn` предоставляет широкий спектр

алгоритмов, включая Support Vector Machines, Random Forest, Decision Trees и другие [120-122].

Второй этап – подготовка данных. В этом контексте необходимо обеспечить, чтобы данные были представлены в формате, наиболее подходящем для обучения модели. Это может включать в себя масштабирование, кодирование категориальных переменных и обработку пропущенных значений.

После этого происходит обучение модели на тренировочных данных. С использованием методов, предоставляемых scikit-learn, модель приспособляется к данным и настраивает свои параметры.

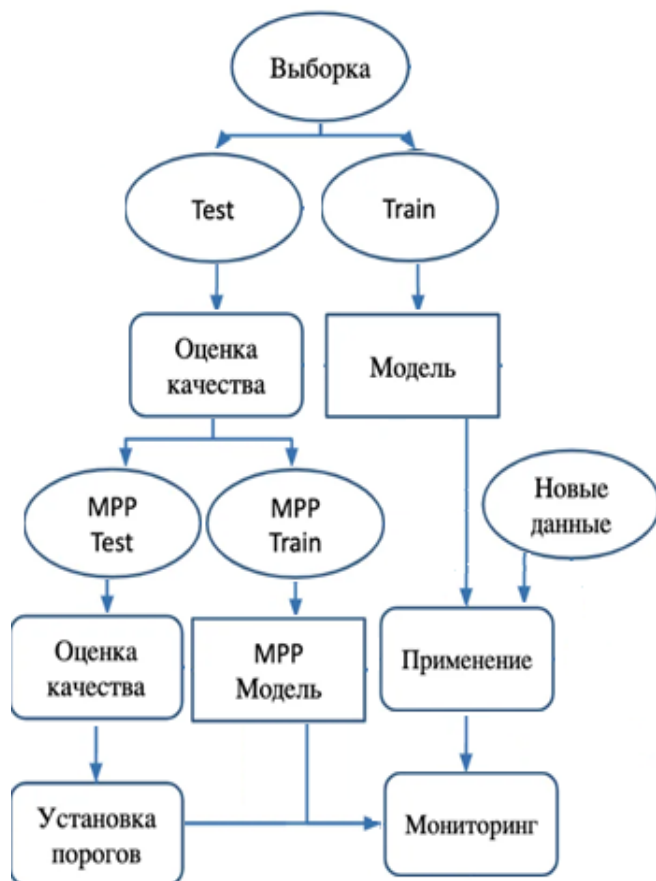


Рисунок 2.7 – Схема обучения алгоритма машинного обучения

Затем модель тестируется на отложенных тестовых данных для оценки ее производительности и обобщающей способности. В случае необходимости можно произвести настройку гиперпараметров для улучшения результатов [123, 124].

Наконец, обученная модель готова к использованию для прогнозирования или классификации новых данных в соответствии с задачей, для которой она была разработана. Схема обучения алгоритма машинного обучения

представлена на рисунке 2.7.

Модель машинного обучения на основе библиотеки scikit-learn, использованная для прогнозирования тепловых потерь через ограждающую конструкцию из газобетонных блоков, представлена в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Элементы модели машинного обучения на основе библиотеки scikit-learn

Назначение	Элемент модели
1	2
	<pre> from sklearn.model_selection import train_test_split from sklearn.linear_model import LinearRegression from sklearn.metrics import mean_squared_error import pandas as pd </pre>
Загрузка данных из отдельных файлов CSV для каждого показателя	<pre> 'K1_температура': 'путь_к_файлу_K1_температура.csv', 'K2_относительная_влажность': 'путь_к_файлу_K2_относительная_влажность.csv', 'K3_скорость_ветра': 'путь_к_файлу_K3_скорость_ветра.csv', 'f1_площадь_стенового_ограждения': 'путь_к_файлу_f1_площадь_стенового_ограждения.csv', 'f2_приведенное_сопротивление_теплопередаче_стеновой_конструкции': 'путь_к_файлу_f2_приведенное_сопротивление_теплопередаче_стеновой_ конструкции.csv', 'f3_соотношение_остекления_к_площади_наружного_ограждения_ помещения': 'путь_к_файлу_f3_соотношение_остекления_к_площади_наружного_ограждения_ _помещения.csv', 'f4_дополнительные_удельные_линейные_потери': 'путь_к_файлу_f4_дополнительные_удельные_линейные_потери.csv', 'f5_конструктивная_плотность_помещения': 'путь_к_файлу_f5_конструктивная_плотность_помещения.csv', 'f6_средняя_высота_этажа': 'путь_к_файлу_f6_средняя_высота_этажа.csv', 'T1_ориентация_конструкции': 'путь_к_файлу_T1_ориентация_конструкции.csv', 'путь_к_файлу_T2_соотношение_остекления_к_площади_наружного_ ограждения_помещения.csv', 'T2_соотношение_остекления_к_площади_помещения': 'путь_к_файлу_T2_соотношение_остекления_к_площади_помещения.csv', 'T3_воздухопроницаемость_помещения': 'путь_к_файлу_T3_воздухопроницаемость_помещения.csv', 'T4_площадь_перемычки': 'путь_к_файлу_T4_площадь_перемычки.csv', 'T5_потери_теплоты_через_ограждающие_конструкции': 'путь_к_файлу_T5_потери_теплоты_через_ограждающие_конструкции.csv', </pre>

1	2
Замена названия ключей на фактические названия показателей	<pre>file_paths = { }</pre>
Считывание данных из каждого файла CSV	<pre>data = {} for key, file_path in file_paths.items(): data[key] = pd.read_csv(file_path)</pre>
Объединение данных в один DataFrame по общему идентификатору	<pre>merged_data = data['Теплопроводность_конструкции'] for key in file_paths.keys(): if key != 'Теплопроводность_конструкции': merged_data = pd.merge(merged_data, data[key], on='ID')</pre>
Разделение на признаки и целевую переменную	<pre>X = merged_data.drop('Тепловые_потери_через_ограждающие_конструкции', axis=1) y = merged_data['Тепловые_потери_через_ограждающие_конструкции']</pre>
Создание обучающего и тестового наборов данных	<pre>X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y, test_size=0.2, random_state=42)</pre>
Создание и обучение модели линейной регрессии	<pre>model = LinearRegression() model.fit(X_train, y_train)</pre>
Предсказание на тестовом наборе данных	<pre>y_pred = model.predict(X_test)</pre>
Оценка качества модели	<pre>mse = mean_squared_error(y_test, y_pred) print(f"Среднеквадратичная ошибка: {mse}")</pre>
Использование модели для прогнозирования тепловых потерь для новых данных	<pre>new_data = { новый набор данных }</pre>
	<pre>new_df = pd.DataFrame(new_data) predicted_heat_losses = model.predict(new_df) print(f"Прогноз тепловых потерь для конструкции: {predicted_heat_losses[0]}")</pre>

Библиотека интегрируется с другими популярными библиотеками Python для анализа данных, визуализации и обработки данных, такими как NumPy, pandas и Matplotlib, что позволяет использовать ее в различных сценариях анализа данных.

2.3. Выводы по второй главе

1. Изложены основные теоретические принципы построения искусственных нейронных сетей, которые направлены на улучшение точности решений задач, поставленных в данном исследовании. В рамках данного исследования будут использованы модель ИНС с использованием программного комплекса Statistica и алгоритма машинного обучения на основе библиотеки scikit-learn.

2. Обоснован перечень входных данных, необходимых для решения задачи определения параметров, влияющих на энергоэффективность зданий. В этот перечень включены различные показатели ограждающих конструкций, такие как теплопроводность, теплоемкость и воздухопроницаемость, а также учитываются климатические факторы, такие как температура воздуха, относительная влажность и скорость ветра. В первом приближении предложены варианты архитектуры нейронной сети для решения данной задачи.

3. Методика работы основана на результатах фундаментальных и прикладных исследований отечественных и зарубежных ученых в области прогнозирования энергоэффективности зданий. Принятие на вооружение целого комплекса методов исследования с использованием современного высокотехнологичного оборудования позволяет получать обоснованные и достоверные результаты прогнозирования теплозащитных характеристик ограждающих конструкций.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЗДАНИЙ ИЗ ГАЗОБЕТОННЫХ БЛОКОВ

3.1. Формирование набора экспериментальных данных для определения теплопотерь через ограждающие конструкции

Данные, необходимые для построения модели ИНС и алгоритма МО, были собраны в наборы данных для жилого многоквартирного дома по ул. Квасова города Белгород (рисунок 3.1 и 3.2), для жилого многоквартирного дома по ул. Попова города Белгород (рисунок 3.3 и 3.4) и многоквартирного дома по ул. 60 города Аль-Рамади (Ирак) (рисунок 3.5 и 3.6). Основные сведения о многоквартирных домах приведены в таблице 3.1 [125].



Рисунок 3.1 – Общий вид многоквартирного дома по ул. Квасова (г. Белгород)

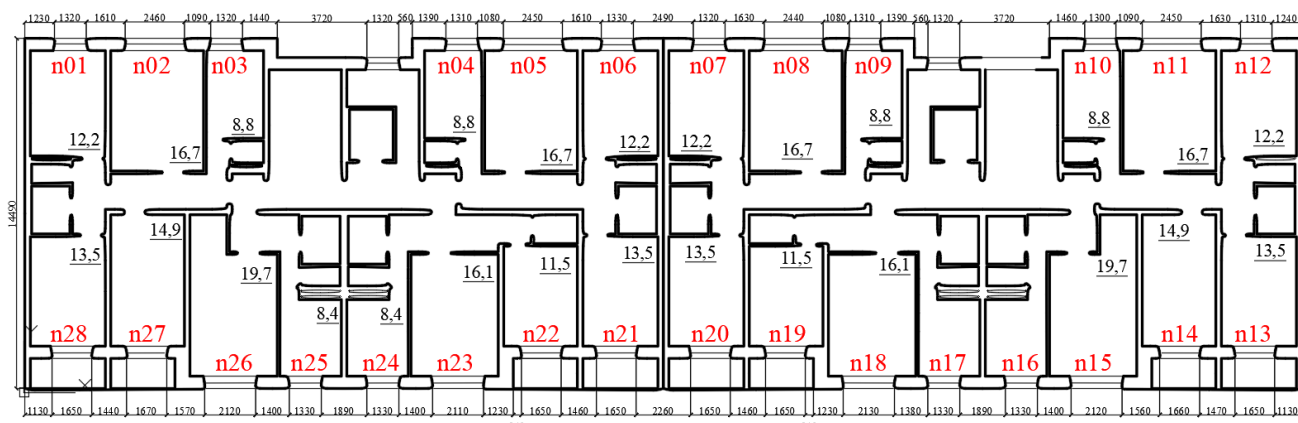


Рисунок 3.2 – План типового этажа многоквартирного дома по ул. Квасова: n – номер этажа



Рисунок 3.3 – Общий вид многоквартирного дома по ул. Попова (г. Белгород)



Рисунок 3.4 – План типового этажа многоквартирного дома по ул. Попова: *n* – номер этажа



Рисунок 3.5 – Общий вид многоквартирного дома по ул. 60 (г. Аль-Рамади, Ирак)

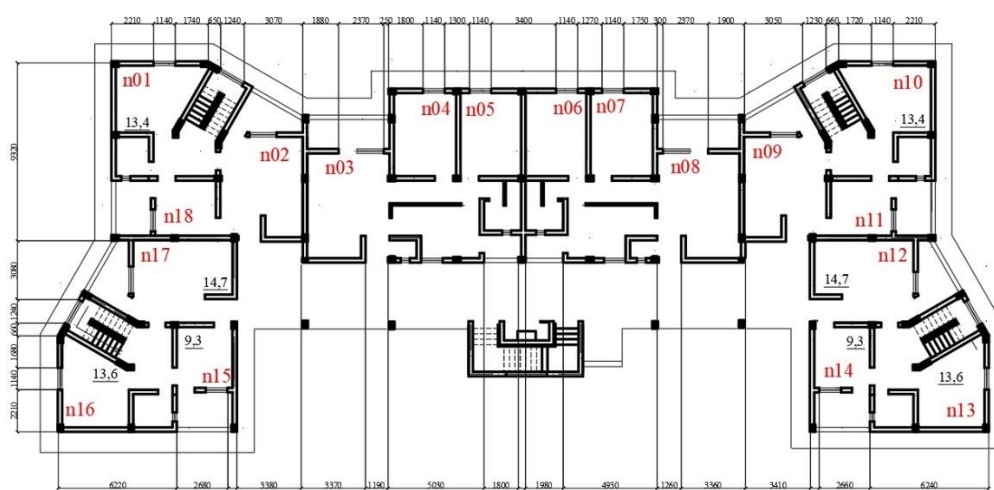


Рисунок 3.6 – План типового этажа многоквартирного дома по ул. 60 (г. Аль-Рамади, Ирак):
n – номер этажа

Таблица 3.1 – Основные сведения о многоквартирных домах

Показатель	ул. Квасова (Белгород)	ул. Попова (Белгород)	ул. 60 (Аль-Рамади, Ирак)
Год ввода в эксплуатацию	2017	2020	2019
Дом признан аварийным	Нет	Нет	Нет
Состояние дома	Исправный	Исправный	Исправный
Количество этажей	9	10	7
>> квартир	96	187	54
>> балконов	120	9	27
>> подъездов	2	6	1
>> лифтов	2	7	1
>> подземных этажей	1	1	1
Износ здания, %	3	0	0
Площадь многоквартирного дома, м ²	5741,5	9382,2	4541,1

Наборы данных для рассматриваемых зданий были распределены по наборам следующим образом: для жилого многоквартирного дома по ул. Квасова города Белгород сформирован Набор 1 (приложение А), для жилого многоквартирного дома по ул. Попова города Белгород – Набор 2 и многоквартирного дома по ул. 60 города Аль-Рамади (Ирак) – Набор 3.

Собранные данные об эксплуатационных показателях выбранных зданий были включены в базу данных путем проведения расчетных и экспериментальных исследований. Каждое помещение в базе данных включает показатели, описанные в п. 2.2. Климатические показатели рассматриваемых районов для формирования наборов данных представлены на рисунках 3.7-3.12.

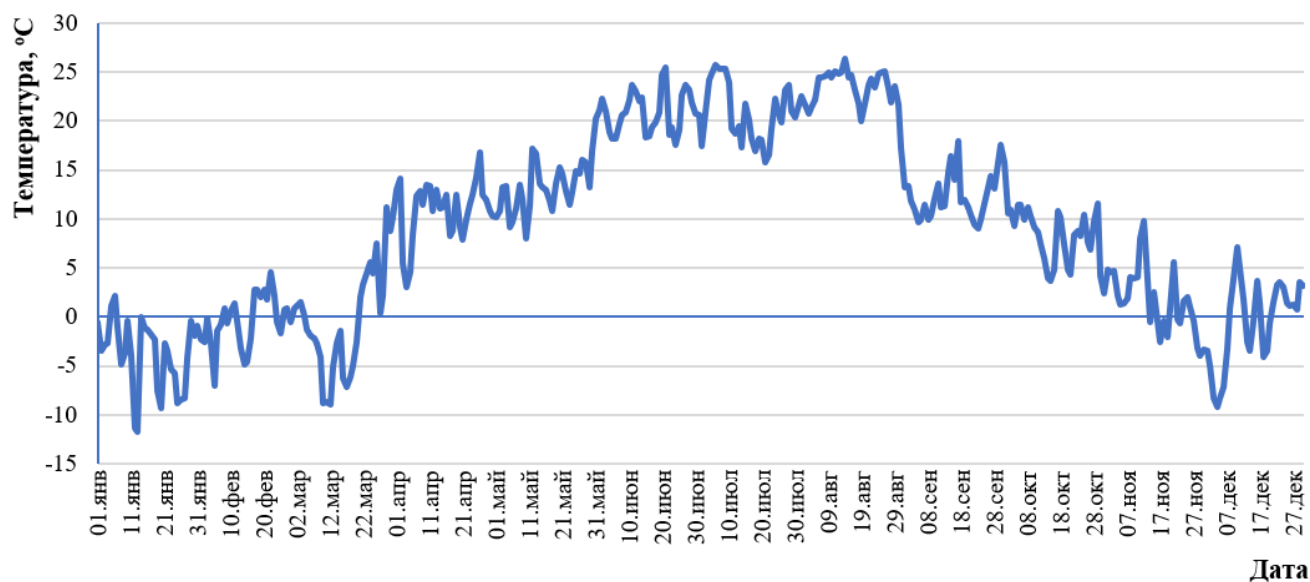


Рисунок 3.7 – Температура наружного воздуха в г. Белгород в 2023 г.

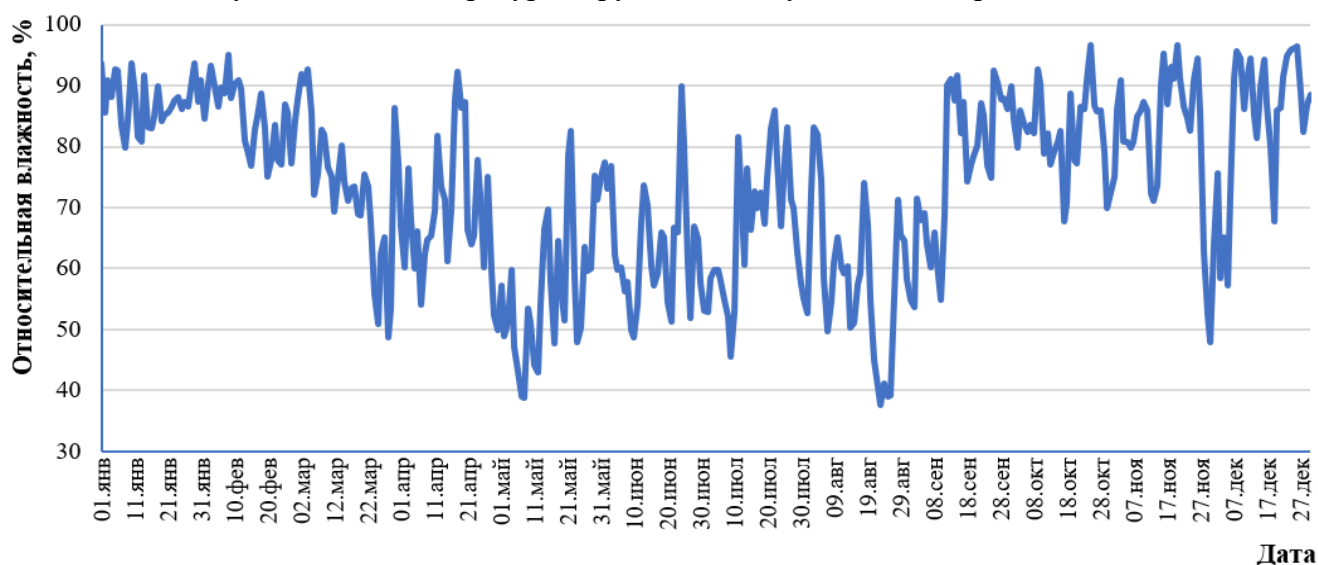


Рисунок 3.8 – Относительная влажность наружного воздуха в г. Белгород в 2023 г.

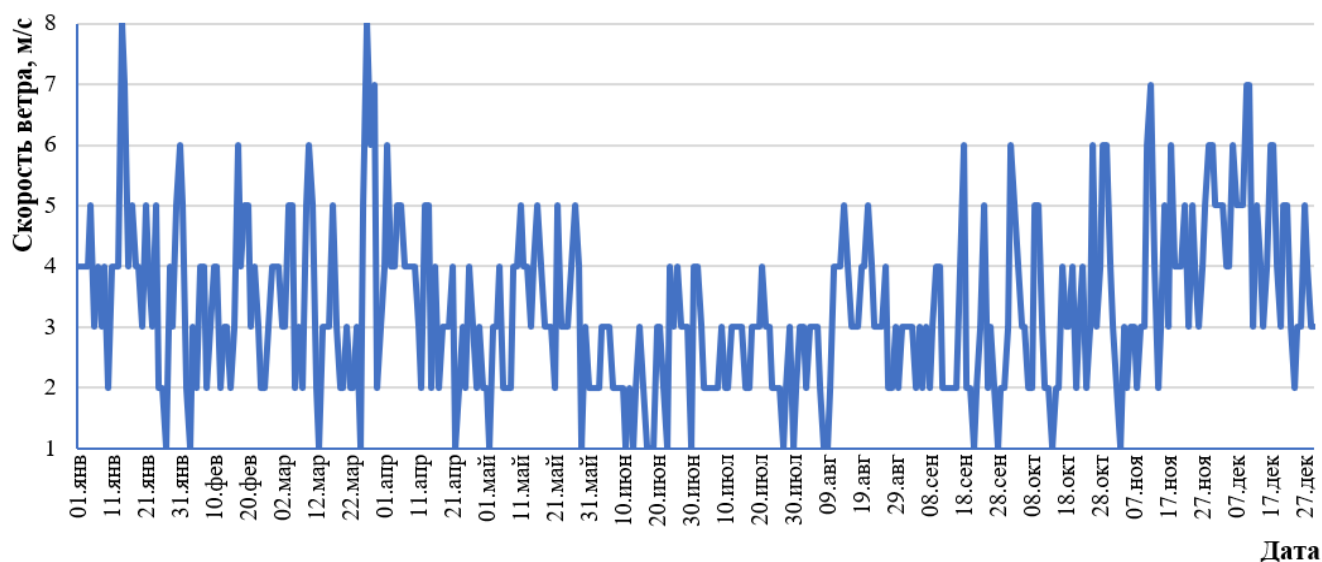


Рисунок 3.9 – Скорость ветра в г. Белгород в 2023 г.

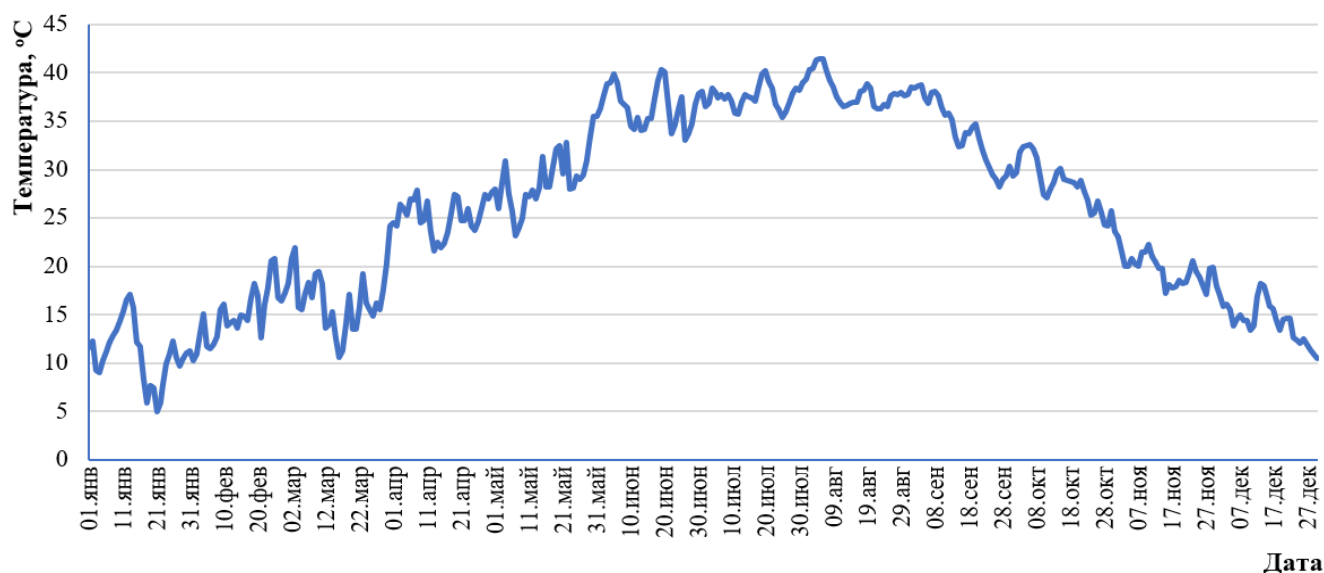


Рисунок 3.10 – Температура наружного воздуха в г. Аль-Рамади в 2023 г.

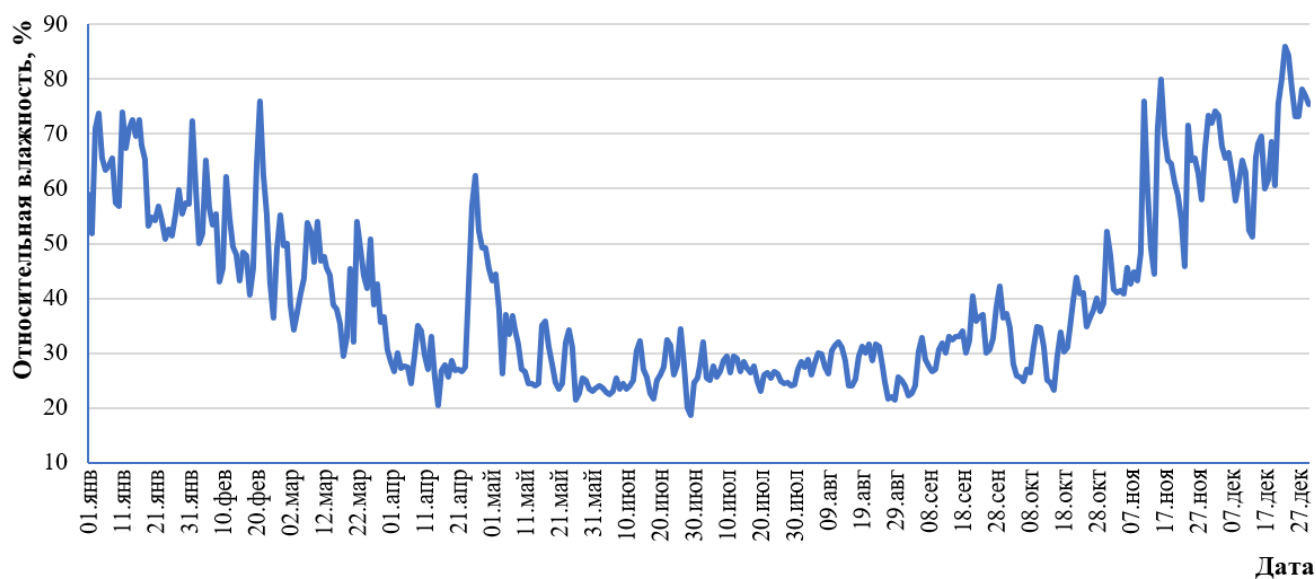


Рисунок 3.11 – Относительная влажность наружного воздуха в г. Аль-Рамади в 2023 г.

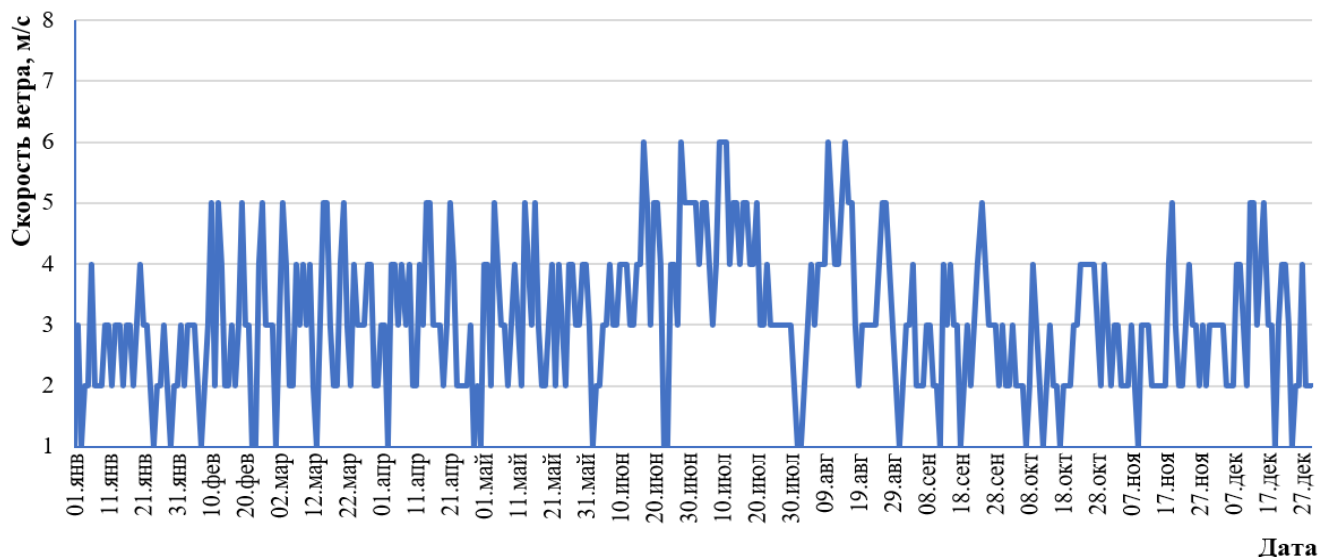


Рисунок 3.12 – Скорость ветра в г. Аль-Рамади в 2023 г.

Формирование набора данных для определения теплотерь для всех наборов данных представлено в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Формирование набора данных для определения теплотерь

Показатель	Обозначение	Алгоритм определения	Диапазон значений
1	2	3	4
Климатические показатели			
Температура наружного воздуха, °С	K1	Принимаются на основе метеорологических данных Гидрометцентра России	-5...+7
Относительная влажность наружного воздуха, %	K2		72...86
Скорость ветра, м/с	K3		4,2...5,1
Конструктивные показатели			
Площадь стенового ограждения помещения, м²	f1	Определяется геометрическими характеристиками здания	4,35...6,7
Приведенное сопротивление теплопередаче стеновой конструкции, (м²·°С)/Вт	f2	Приведенное сопротивление теплопередаче конструкции рассчитываемого фрагмента определяется по формуле: $R_o' = \Sigma A_i / (\Sigma A_i / R_{o,i} + \Sigma L_j \psi_j),$ где A_i – площадь конструкции i -го вида в рассматриваемом фрагменте, м²; L_j – протяженность всех стыков j -го вида в рассматриваемом фрагменте, м; $R_{o,i}$ – сопротивление теплопередаче однородной части конструкции i -го вида, (м²·°С)/Вт; ψ_j – дополнительные удельные линейные потери теплоты через стык j -го вида, Вт/(м·°С).	3,48...3,50

1	2	3	4
Площадь перемычки, м ²	f3	Определяется геометрическими характеристиками здания	0,52...0,86
Дополнительные удельные линейные потери через стык перемычки и стены, Вт/(м ² ·°C)	f4	Дополнительные удельные линейные теплопотери определяются по формуле: $\psi_j = \Delta Q L_j / (t_{int} - t_{ext}),$ где t_{int} – расчетная температура воздуха со стороны внутренней поверхности конструкции °C; t_{ext} – расчетная температура воздуха со стороны наружной поверхности конструкции, °C; $\Delta Q L_j$ – дополнительные потери теплоты через стык j -го вида, приходящиеся на один погонный метр стыка, Вт/м.	0,07...0,11
Конструктивная плотность помещения, м	f5	Определяется геометрическими характеристиками здания	0,28...0,66
Средняя высота этажа, м	f6	Определяется геометрическими характеристиками здания	2,8...3,0
Характеристики объемно-планировочного решения помещений			
Коэффициент остекленности фасада	T1	Определяется геометрическими характеристиками здания и равен отношению площади остекления к площади наружной стены помещения	0,42...0,64
Световой коэффициент	T2	Определяется геометрическими характеристиками здания и равен отношению площади остекления к площади пола помещения	0,16...0,24
Воздухопроницаемость помещения, 1/ч	T3	Определяется на основе результатов экспериментального исследования объемного расхода воздуха через ограждающие конструкции для естественных условий при 50 Па	2,04...2,98
Ориентация конструкции	T4	Характеризуется добавочным коэффициентом (b) к основным теплопотерям в зависимости от ориентации ограждения по сторонам света	0...0,1
Потери теплоты через ограждающие конструкции, Вт	T5	Теплопотери за счет теплопередачи $Q_{огр}$, Вт, рассчитываются через каждое теплоотражающее ограждение по формуле: $Q_{огр} = K A \Delta t n (1 + \sum b),$ где K – коэффициент теплопередачи ограждения, Вт/(м ² ·°C); A – площадь поверхности, м ² ; Δt – разность температур поверхности и воздуха, °C; n – коэффициент положения ограждения относительно наружного воздуха; b – коэффициент, учитывающий добавочные теплопотери.	0,20...0,78

Чтобы обеспечить адекватность модели ИНС и алгоритма МО в расчете тепловых потерь через ограждающие конструкции, а также с учетом соблюдения допущений анализа, была проведена проверка полученных характеристик

объемно-планировочного решения и конструктивных показателей на соответствие нормальному закону распределения [126].

Гистограммы распределения полученных данных представлены на рисунках 3.13-3.15, где демонстрируется стандартное отклонение показателя от его среднего значения.

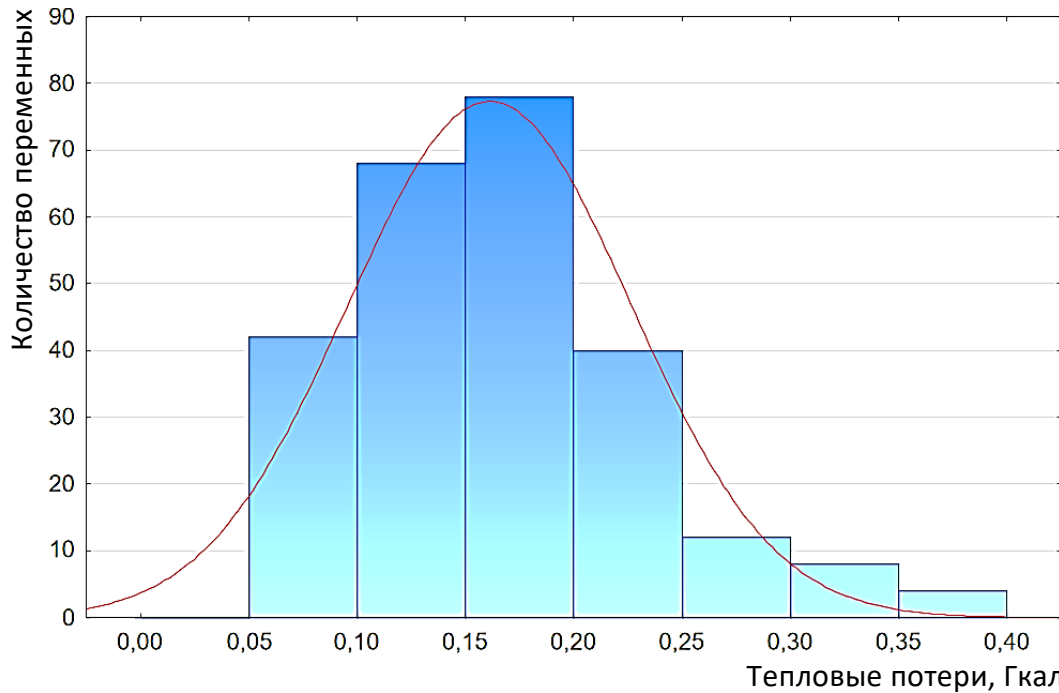


Рисунок 3.13 – Гистограмма с нормальным распределением значений тепловых потерь через ограждающие конструкции для Набора 1

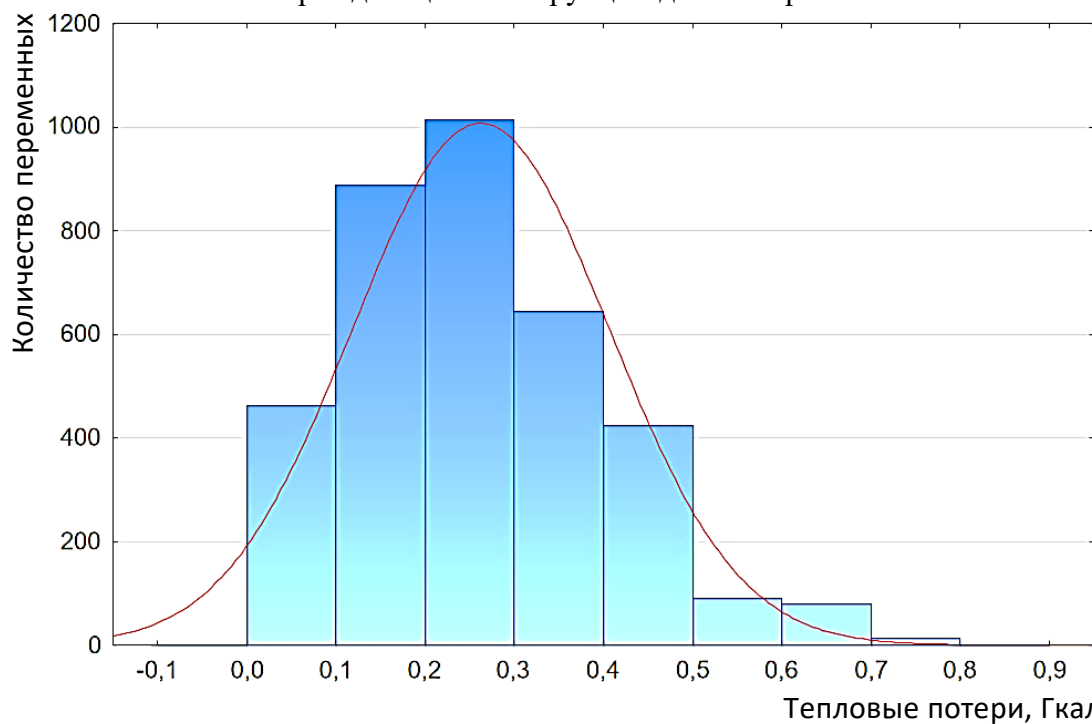


Рисунок 3.14 – Гистограмма с нормальным распределением значений тепловых потерь через ограждающие конструкции для Набора 2

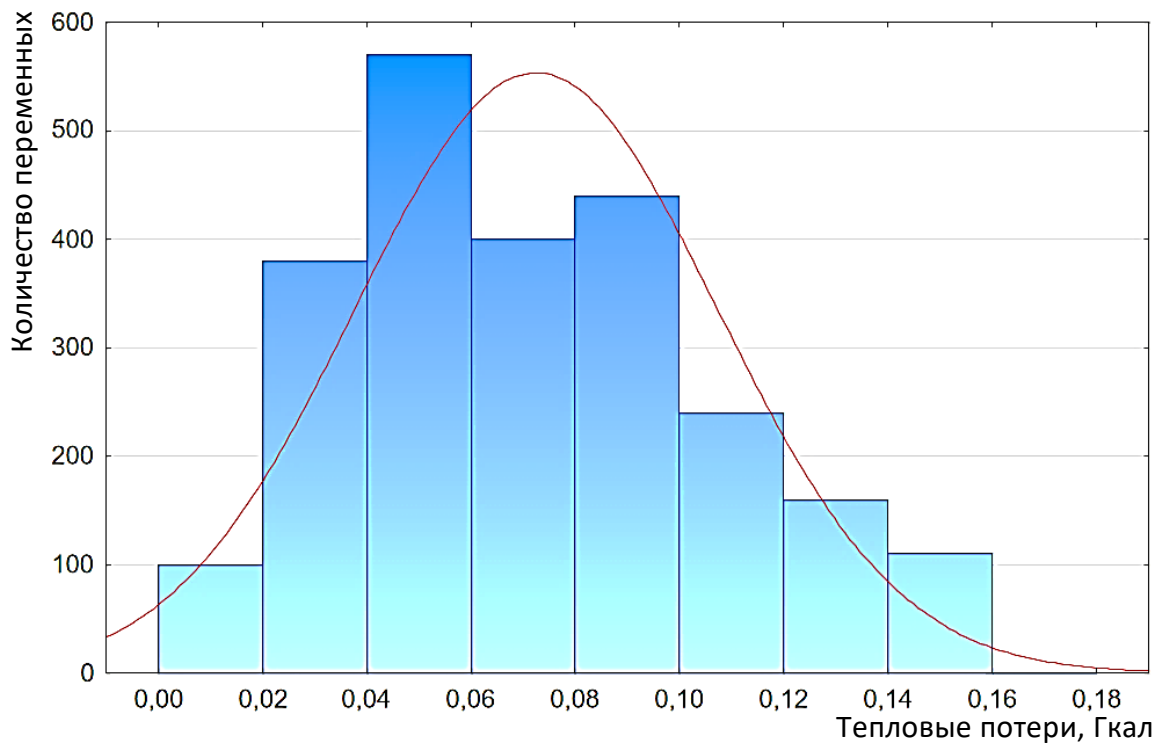


Рисунок 3.15 – Гистограмма с нормальным распределением значений тепловых потерь через ограждающие конструкции для Набора 3

Основной принцип состоит в том, что чем меньше стандартное отклонение, тем точнее оценка соответствует фактическим данным. Следовательно, модель можно считать пригодной и применимой для прогнозирования, когда оставшееся стандартное отклонение прогнозных значений ниже, чем стандартное отклонение целевых значений. Такой подход обеспечивает надежность и точность модели, что позволяет использовать ее для прогнозирования тепловых потерь через ограждающие конструкции с высокой степенью достоверности.

3.2. Разработка энергоэффективной составной перемычки из газобетонных блоков

С целью повышения энергоэффективности здания и сокращения тепловых потерь через ограждающие конструкции была разработана составная перемычка. Данная перемычка представляет собой конструкцию, состоящую из газобетонных блоков, специально армированных лентами из углеродных волокон и стержневой арматурой [127-129].

3.2.1. Исследование прочностных и деформативных характеристик составной перемычки

3.2.1.1. Методика проведения экспериментальных исследований

Целью исследования является оценка возможности применения составных перемычек из газобетонных блоков в качестве перекрытия оконных и дверных проемов ограждающих конструкций зданий. Проведенные экспериментальные исследования армированных газобетонных перемычек проводились в университете Дияла (Баакуба, мухафаза Дияла, Ирак) с целью собрать данные, которые будут использоваться для оптимизации управления жизненным циклом здания на этапе его строительства.

В рамках этих исследований были поставлены следующие задачи:

- разработать методику проведения эксперимента;
- выявить характер воздействия внешнего композитного армирования на прочность и деформативность армируемых конструкций;
- определить влияние наличия и ширины раскрытия нормальных трещин на напряженно-деформированное состояние армированных конструкций;
- оценить возможность использования армированных газобетонных перемычек, изготавливаемых на предприятиях Республики Ирак, в многоэтажных зданиях на основе результатов экспериментальных исследований.

Для решения данных задач были изучены результаты экспериментальных исследований Nasim Uddin [130-132], Erturk Tuncer [133], Я.Е. Григорьевой [134], С.М. Есипова [135], С.И. Меркулова [136-139], В.М. Дворникова [140], Д.Н. Смердова [141], Е.Н. Бадаловой [142], А.Н. Костенко [143], А.В. Юшина [144].

Для реализации поставленных задач исследования разработана программа испытания образцов, проведена оценка объема и количества испытываемых образцов перемычек и элементов армирования, их геометрических размеров и физико-механических характеристик, калибровка и подготовка оборудования, инструментов и измерительных приборов, изготовлены опытные образцы.

Материалы и конструкция испытываемых образцов были подобраны в соответствии с требованиями к проектированию газобетонных конструкций [145].

С целью исключения влияния масштабного фактора на результаты расчетов, опытные образцы рассматривались как моделирующие реальные конструкции в натуральных условиях.

Для решения сформулированных задач автором в рамках экспериментальных исследований были предусмотрены испытания основных образцов – газобетонных перемычек и вспомогательных образцов – бетонных кубов, арматурных стержней, лент из углеродных волокон, газобетонных блоков с приклеенными лентами из углеродных волокон. Газобетонные блоки были изготовлены на заводе «Factory for Production Lightweight Blocks» (г. Аль-Рамади, Ирак), опытные образцы газобетонных перемычек были изготовлены в строительной лаборатории инженерного колледжа в университете Дияла (Баакуба, мухафаза Дияла, Ирак). Образцы были изготовлены из газобетона класса по прочности на сжатие B3,5, марки по средней плотности D500. Размеры опытных образцов составили 200(*h*)×240(*w*)×1200(*L*) мм. Расчетный пролет перемычки составил 1100 мм. Конструкция, материалы и размеры образцов запроектированы согласно требованиям к технологии изготовления и с целью обеспечения получения достоверных результатов.

В качестве заполнителя шва применялся клеевой состав для газобетонных блоков с пределом текучести при растяжении 0,9 МПа.

В качестве стержневого армирования применялись стержни из арматурной стали A400 Ø8 мм (минимальный коэффициент армирования μ_{min}) и A400 Ø10 мм (максимальный коэффициент армирования μ_{max}).

Подбор состава бетонной смеси был произведен согласно требованиям, ASTM-C39 [146]. В целях уточнения и корректировки состава бетонной смеси предварительно были проведены расчеты и изготовлены дополнительные вспомогательные образцы – кубы размерами 100×100×100 мм. Кубы были вырезаны из газобетонных блоков с помощью резака, а поверхности кубиков отшлифованы наждачной бумагой. Кубы испытывали на прочность при сжатии с

помощью машины для испытаний на сжатие, помещая кубики между плитами и прикладывая нагрузку по направлению подъема бетона из расчета $0,5-2 \text{ кг/см}^2$ таким образом, чтобы разрушение происходило в течении 30 с. Значение прочности на сжатие кубов приведено в таблице 3.3. Изготовление и хранение образцов производилось в условиях завода «Factory for Production Lightweight Blocks» (г. Аль-Рамади, Ирак). Кубы выдерживались в течение 7 сут до набора прочности, а затем были испытаны на сжатие в лабораторном прессе. В соответствии с расчетами и испытаниями образцов на прочность при сжатии, было установлено, что бетон соответствует классу по прочности В3,5.

Таблица 3.3 – Результаты испытания образцов газобетона

Маркировка образца	Возраст образца, сут	Прочность на сжатие, МПа	Плотность, кг/м^3
M1	7	2,5	500
M2		2,7	500
M3		2,9	500
M4		3,2	550
M5		3,0	550
M6		3,3	550

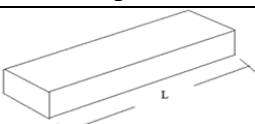
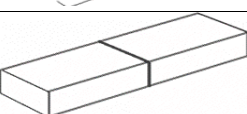
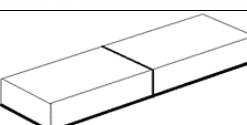
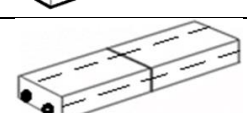
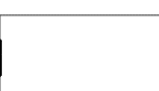
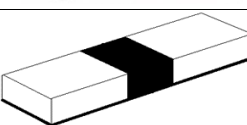
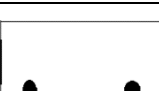
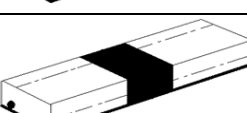
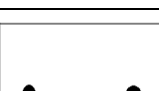
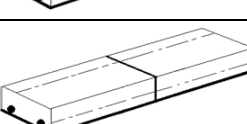
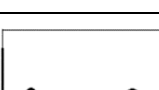
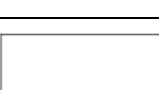
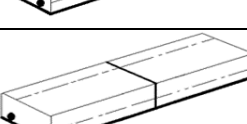
Испытание на плотность и влажность в сухом состоянии проводилось в соответствии со стандартом ASTM C642-97 [147].

В качестве внешнего полосового армирования были использованы однонаправленные ленты из углеродных волокон с модулем упругости 230 000 МПа, предельной деформацией растяжения 0,3 и толщиной 1,29 мм, работающие на изгиб, ориентированы вдоль растянутой грани элемента, а поперечные ленты, работающие на сдвиг, ориентированы на 90° относительно продольной оси перемычки. Ленты из углеродных волокон прикрепляются к газобетонным блокам при помощи эпоксидного клея с модулем упругости 3800 МПа и прочностью на растяжение при изгибе 30 МПа.

Геометрические размеры сечений опытных образцов, классы бетона и арматуры, конфигурация и диаметры стержней армирования приняты на основании предварительных расчетов с учетом недопущения разрушения по наклонным сечениям либо вследствие потери общей устойчивости.

В рамках исследования было изготовлено 9 серий образцов с различным типом армирования. Схемы армирования перемычек представлены в таблице 3.4 [148, 149].

Таблица 3.4 – Схемы армирования перемычек

Наим-е образца	Поперечное сечение	Изометрический вид перемычек	Типы армирования
КП1			А: без армирования
П1			А: без армирования
П1-1			Б: армирование лентами из углеродных волокон на изгиб только с нижней поверхности
П1-1.1			В: стержневое армирование
П1-2			Г: армирование лентами из углеродных волокон в растянутой зоне и в зоне соединения блоков
П1-3			Д: комбинированное армирование (ленты из углеродных волокон + стержневое армирование) и армирование швов с (μ_{min})
П1-4			Е: комбинированное армирование (ленты из углеродных волокон + стержневое армирование) в растянутой зоне с (μ_{min})
П1-5			Д: комбинированное армирование (ленты из углеродных волокон + стержневое армирование) в растянутой зоне и в зоне соединения блоков с (μ_{max})
П1-6			Е: комбинированное армирование (ленты из углеродных волокон + стержневое армирование) в растянутой зоне с (μ_{max})

Для подготовки газобетонных перемычек к испытаниям на изгиб были выполнены следующие этапы:

Склеивание блоков, штробление образцов, установка сварного каркаса, заделка сварного каркаса цементным раствором, установка тензорезисторов, подготовка измерительных приборов.

Склеивание блоков, выполнялось в следующей последовательности:

- очистка соединяемых сторон каждого блока от пыли воздуходувкой;
- вертикальная установка блоков;
- нанесение на соединительную сторону одного из блоков раствора для кладки газобетонных блоков толщиной не более 5 мм;
- соединение газобетонных блоков без раствора и с цементным раствором, и выдержка его вертикально в течение одной минуты, чтобы обеспечить прочное сцепление между блоками и удалить внутренние пузырьки воздуха;
- общая выдержка перемычки в течение 24 ч до высыхания швов.

Данный этап подготовки применялся ко всем образцам, кроме КП1, поскольку они представляли собой газобетонные перемычки в виде сплошной перемычки без кладочного шва.

Для армирования перемычек стальными стержнями были выполнены штробы в продольном направлении перемычек и по вертикали по схеме Fib TG 9.3 [133, 150], максимальном коэффициенте армирования μ_{max} : $h_g = 40$ мм, $b_g = 30$ мм, $a_c = 40$ мм и $a'_c = 55$ мм, а минимальном коэффициенте армирования μ_{min} : $h_g = 32$ мм, $b_g = 24$ мм, $a_c = 40$ мм и $a'_c = 52$ мм. Система армирования стальными стержнями представлена на рисунке 3.16. Общий вид пазов на газобетонных перемычках для армирования на изгиб и сдвиг представлен на рисунке 3.17.

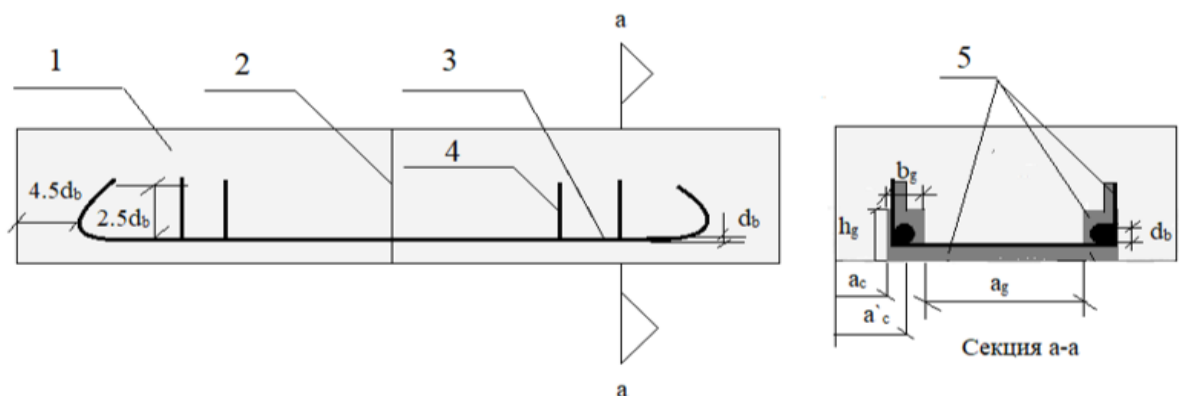


Рисунок 3.16 – Система армирования поверхности стальным стержнем с анкерровкой арматуры: 1 – газобетонное основание; 2 – вертикальный шов; 3 – продольный стержень (A400 Ø10 мм); 4 – вертикальная арматура (A400 Ø8 мм); 5 – штробы



Рисунок 3.17 – Общий вид пазов на газобетонных перемычках для армирования на изгиб и сдвиг

Высота штробы равна 4-кратному диаметру стального стержня, а ширина штробы равна 3-кратному диаметру стального стержня, при этом ширина бетонной кромки принималась не менее 40 мм. Данный метод армирования применялся на образцах П1-1.1, П1-3, П1-4, П1-5 и П1-6.

После установки тензорезисторов на поверхность стальных стержней производилась установка и заделка арматурного каркаса раствором для кладки газобетонных блоков (рисунок 3.18).



Рисунок 3.18 – Установка арматурного каркаса в газобетонных перемычках

На обработанную поверхность перемычек нажимом приклеивались ленты из углеродных волокон для того, чтобы избежать пузырьков воздуха между материалами. Ленты имели размеры 300×5000 мм, с толщиной 0,129 мм.

Кроме того, после установки лент из углеродных волокон снова необходимо покрасить ленты сверху эпоксидной смолой, чтобы защитить ленты от внешних ударов и условий окружающей среды. Не менее чем через 5 сут после установки лент в условиях лаборатории возможна загрузка газобетонных перемычек.

3.2.1.2. Испытания газобетонных перемычек

В качестве метода нагружения было выбрано нагружение с помощью гидравлических домкратов, так как оно обеспечивает возможность приложения нагрузок высоких значений (до 600 кН), позволяет определять величину прилагаемой нагрузки с высокой точностью, а также, в отличие от гравитационного типа способа нагружения, снимать показания измерительных приборов и следить за работой образцов под нагрузкой, не отвлекаясь на догружение стенда штучными грузами.

Все образцы испытывались в соответствии с DIN EN 846-9-2016 [151] на четырехточечный изгиб. Схема и установка для испытаний составных перемычек для четырехточечного нагружения представлена на рисунке 3.19.

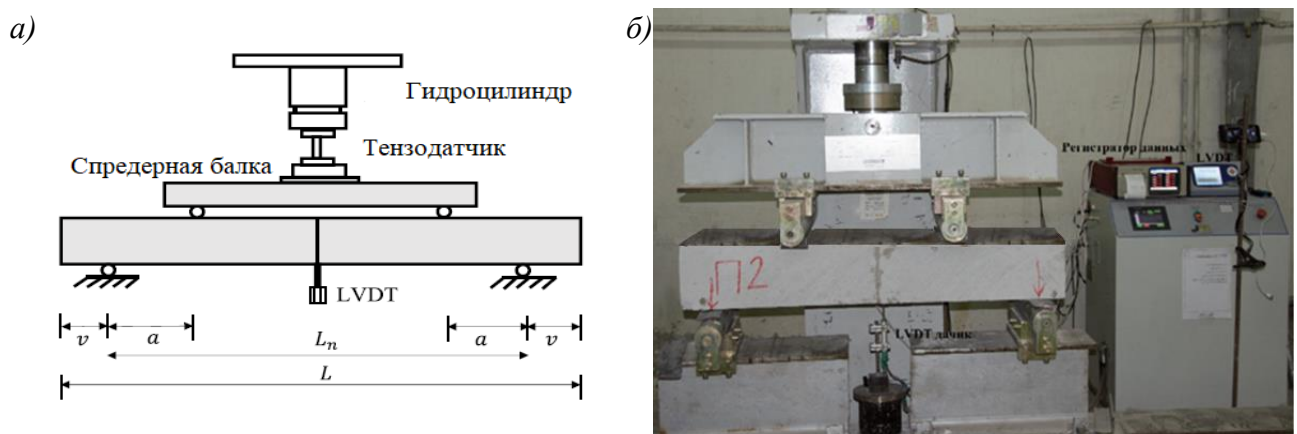


Рисунок 3.19 – Система загрузки: а – схема испытаний перемычек; б – установка для испытаний: L – длина балки; L_n – длина пролета в свету; a – пролет сдвига

Нагрузка прикладывалась с использованием универсальной гидравлической машины мощностью 2000 кН. Скорость нагрузки была принята 1,5 мм/мин от

смещения середины пролета в соответствии с DIN EN 846-9-2016 [151]. Система сбора данных непрерывно записывала приложенные значения нагрузки и смещения в цифровом виде.

Для определения точности измерения величин нагрузки, напряжения деформации в зоне сжатия и растяжения и величины прогиба в среднем пролете перемычки использовали три прибора:

- регистратор данных (DATA LOGGER TDS-540) (рисунок 3.20, 1) для измерения деформации в зоне сжатия (для газобетона) и зоны растяжения (для стальных стержней);

- прибор LVDT (SUPER-PLUS EVOLUTION) с датчиком (рисунок 3.20, 2). Устройство для измерения вертикального смещения перемычек в середине пролета. Оно измеряется непосредственно в миллиметрах.

- гидравлический испытательный пресс SERVO CONTROLLED HYDRAULIC UNIT (рисунок 3.20, 3) с пролетом менее 3 м и мощностью 1600 кН. Это устройство связано с гидравлическим блоком и имеет экран для настройки и контроля скорости нагружения.



Рисунок 3.20 – Приборы для испытания газобетонных перемычек: 1 – регистратор данных; 2 – прибор LVDT; 3 – гидравлическая машина

В исследовании применялись тензорезисторы двух типов:

- тензорезисторы для бетона, которые и служат для измерения деформации в зоне сжатия (рисунок 3.21, *а*);
- тензорезисторы для арматуры (рисунок 3.21, *б*) использовались для измерения деформации в зоне сжатия и растяжения, которые были приклеены непосредственно на поверхность стержней с помощью того же клея.

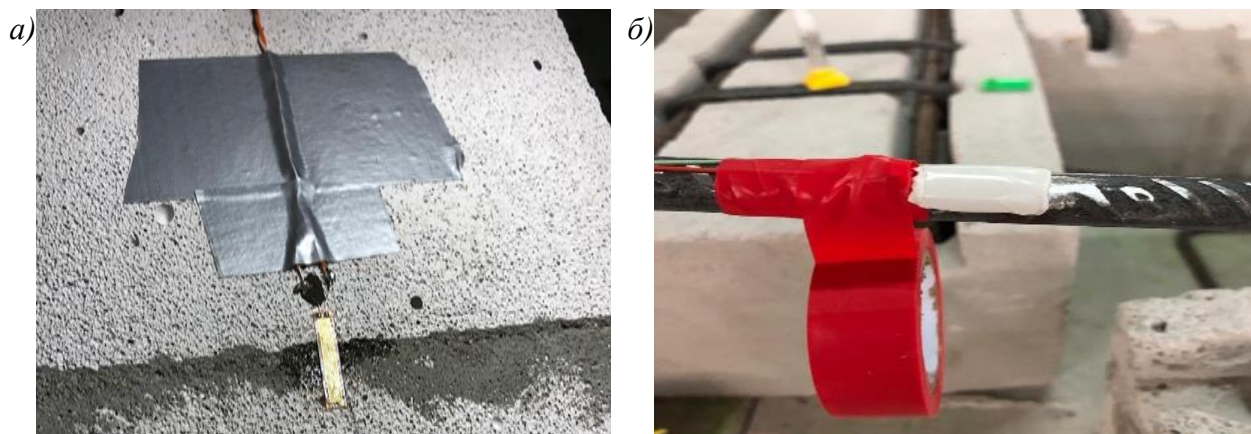


Рисунок 3.21 – Установка тензорезисторов: *а* – на кладочный шов газобетонных перемычек; *б* – на стальном стержне в центре пролета перемычки

Датчики для бетона были установлены снаружи на верхней грани газобетонных перемычек в середине пролета с помощью клея TML после очистки и выравнивания верхнего слоя газобетонных перемычек в зоне сжатия. Для удержания тензорезисторов от вала пресса при испытании газобетонных перемычек точечной нагрузкой использовалась резиновая прокладка, прикрепленная к верхней поверхности перемычек и надетая на нее металлическую пластину.

Для установки лент из углеродных волокон в качестве внешнего полосового армирования использовалась эпоксидная смола Sikadur® 330 [152], состоящая из двух компаундов: компонент А (смола) и компонент Б (отвердитель). Компаунды смешиваются друг с другом в соотношении 1:4 электродрелью с венчиком в течение не более 30 с. После этого с помощью специальной кисти бетонная поверхность хорошо пропитывается смолой.

3.2.1.3. Результаты испытаний газобетонных перемычек и их анализ

Испытания образцов газобетонных перемычек были проведены в соответствии с установленной методикой испытаний в определенные сроки.

На основании полученных результатов испытаний проведен анализ, позволяющий установить особенности напряженно-деформированного состояния после армирования, величины предельных изгибающих моментов, а также изменение таких показателей, как момент трещинообразования, прогиб, деформации газобетона и ширина раскрытия трещин в зависимости от режима армирования.

Значения предельных изгибных нагрузок, напряжений и деформаций при испытаниях образцов газобетонных перемычек приведены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Значения предельных изгибных нагрузок, напряжений и деформаций при испытаниях образцов

Наим-е образца	Нагрузка $P_{\max}$, кН	Прогиб $f_{\max}$, мм	Напряжения $\sigma_{\max}$, кН/м ²	Относительная деформация $\varepsilon_{\max}$	Характер разрушения
КП1	5,3	0,4	1,5	0,000282	Хрупкое разрушение под действием силы сдвига в середине пролета
П1	2,3	0,2	1,45	0,000467	Разрушение кладочного шва
П1-1	16,5	3,44	4,5	0,003399	>> при сдвиге
П1-1.1	17,8	4,97	5,38	0,004169	>> кладочного шва
П1-2	21,5	2,49	5,91	0,001867	>> при сдвиге
П1-3	27,2	2,12	8,23	0,003917	>> при сдвиге
П1-4	25,2	3,16	7,64	0,001382	>> при сдвиге
П1-5	31,4	6,72	9,51	0,005075	>> по нормальным сечениям в зоне чистого изгиба
П1-6	26,3	4,57	7,96	0,003373	>> при сдвиге

По результатам испытаний газобетонных изгибаемых перемычек на изгиб построена диаграмма напряженно-деформированного состояния, представленная на рисунке 3.22.

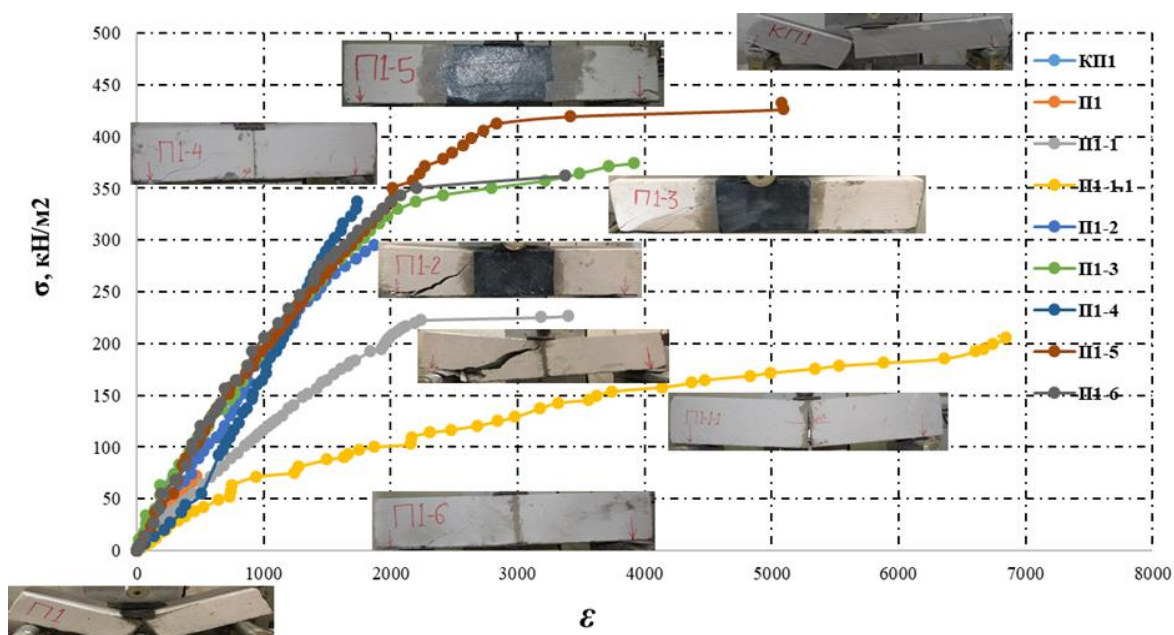


Рисунок 3.22 – Диаграмма напряжений и деформаций составных перемычек

При увеличении изгибающих напряжений от нагрузки, очевидно, возрастала деформация армированных образцов. Также предел текучести армированных образцов П 1-1, П1- 3, П1-4, П1-5 и П1-6 имеет малый интервал предела деформации при увеличении нагрузки. Кроме того, упругопластическая зона под кривой для армированных образцов явно увеличилась, с другой стороны, образец со стержневым армированием показывает огромные значения деформации при малых значениях нагрузки, где предельное напряжение составляет 209 кН/м^2 , а предельное значение деформации 0,69.

Что касается напряжения на изгиб при приложенной нагрузке, то в моделях П1 и П1-1 прочность на изгиб увеличилась в 3 раза при добавлении одного слоя волокон в зоне растяжения и отсутствии разрушения в кладочном шве.

Для образцов П1-3, П 1-4, П1-5 и П1-6 большую роль играют коэффициент армирования ρ и форма армирования за счет увеличения предела прочности при изгибе и уменьшения значений предельных деформаций.

Диаграмма нагрузка-прогиб для составных перемычек с характером разрушения приведена на рисунке 3.23.

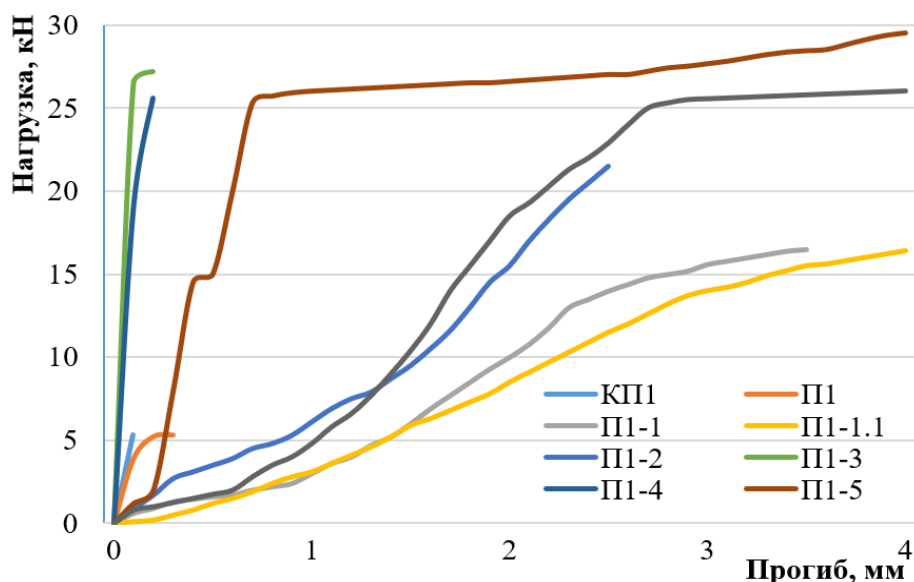


Рисунок 3.23 – Диаграммы нагрузка-прогиб для составных перемычек с характером разрушения

Для рассматриваемых образцов серии характерен классический характер деформирования. В начале нагружения наблюдается линейный характер зависимости прогиба от изгибающего момента в сечении. При достижении величины изгибающего момента, соответствующего фактическому моменту трещинообразования, происходит перелом линии диаграммы, сопровождающийся уменьшением угла подъема линии диаграммы.

При достижении величины изгибающего момента, соответствующего разрушающему моменту, напряжения в арматуре не достигают предела текучести, после чего наблюдается значительный рост прогибов и деформаций при отсутствии увеличения момента. На этом участке диаграмма имеет линейный характер.

На основании показаний тензорезисторов и индикаторов часового типа определены величины продольных деформаций по высоте сечения образцов на отдельных этапах нагружений. Величины продольных деформаций как в сжатой зоне, так и в растянутой на противоположных боковых гранях образцов имели разницу не более 5 %, что свидетельствует о симметричном распределении изгибающего момента в поперечном сечении. На этапах, предшествующих разрушению образцов некоторые из тензорезисторов были выведены из строя вследствие их разрыва, после чего регистрация их показаний была остановлена.

Диаграмма продольных деформаций газобетонных изгибаемых перемычек по высоте сечения образца показана на рисунке 3.24.

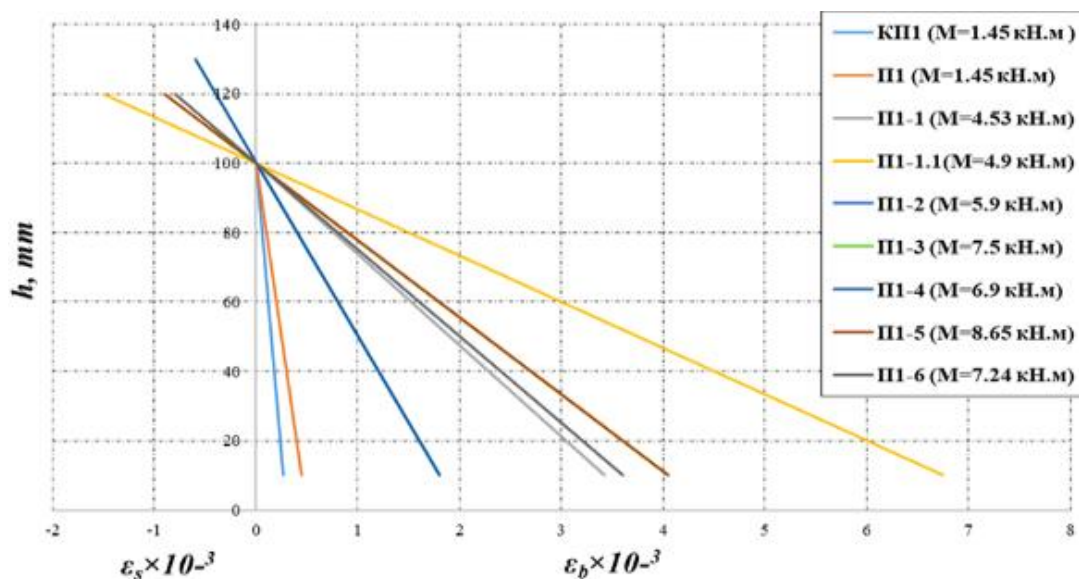


Рисунок 3.24 – Продольные деформации газобетонных перемычек

Анализируя диаграммы, представленные на рисунке 3.24, можно судить о характере распределения продольных деформаций по высоте сечения как о близком к линейному для всех образцов всех серий.

По данным тензодатчиков, установленных на лентах из углеродного волокна для образца П1-3 с внешним полосовым армированием, на изгибные и сдвиговые напряжения построена диаграмма распределения относительных деформаций композита по его длине вдоль образца, приведенная на рисунке 3.25.

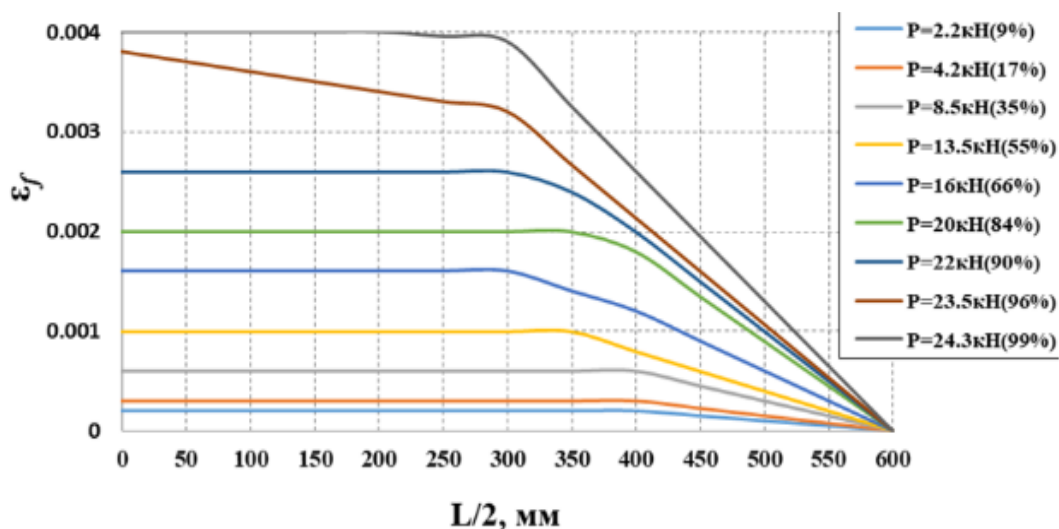


Рисунок 3.25 – Диаграмма распределения относительных деформаций углеродного волокна по длине анкеровки на образце П1-3

Диаграмма на рисунке 3.25 свидетельствует о затухающем характере распределения деформаций ε_f элемента армирования по длине образца. До достижения $\varepsilon_f \approx 0,26 \%$ относительные деформации распределяются между точками, соответствующими $L = 0-50$ мм и $L = 300$ мм довольно равномерно после превышения указанной величины, деформации при $L = 300$ мм начинают отставать от максимальных значений. Изменение ε_f в интервале $L = 300-600$ мм линейно в соответствии с линейным уменьшением изгибающего момента в сечениях.

На основании проведенных исследований разработаны патенты РФ на полезную модель (приложения Б-Г), а также получено свидетельство о государственной регистрации Базы данных (приложение Д).

Исходя из полученных данных, автором было составлено аналитическое описание различий в подходах к гипотезам работы усиленного элемента, приведенное в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Сравнение предпосылок и действительных факторов при работе армированного элемента под нагрузкой

Предпосылки о работе армированного элемента под нагрузкой	Факторы действительной работы армированного элемента под нагрузкой
1. Отсутствие деформаций сдвига в клеевом шве	1. Деформации сдвига присутствуют
2. Система внешнего армирования и основная конструкция работают совместно вплоть до разрушения	2. При определенных уровнях деформаций происходит отслоение внешнего армирования совместно с защитным слоем бетона от конструкции
3. Предельным состоянием является достижение напряжений в композитном материале, равных расчетному сопротивлению	3. Отслоение и разрушение сжатой зоны бетона наступает раньше достижения напряжениями во внешнем армировании величины расчетного сопротивления
4. Расчетная схема армированной конструкции остается такой же, как и до армирования	4. После начала отслоения вплоть до разрушения, конструкция работает как статически неопределимая балка с затяжкой (при наличии торцевых анкеров)

3.2.1.4. Компьютерное моделирование изгибаемых газобетонных элементов

Для моделирования работы изгибаемых газобетонных перемычек был проведен численный эксперимент в программе конечно-элементного моделирования и анализа ANSYS 15, а конкретно на платформе Workbench static structural и Mechanical APDL.

Модели перемычки представляли собой трехмерные конечно-элементные модели с заданными механическими свойствами материалов, используемых в процессе усиления образцов, граничными условиями (рисунок 3.26) и полным соединением между двумя гранями газобетонными блоками с указанием моделирования поверхностной арматуры (рисунок 3.27).

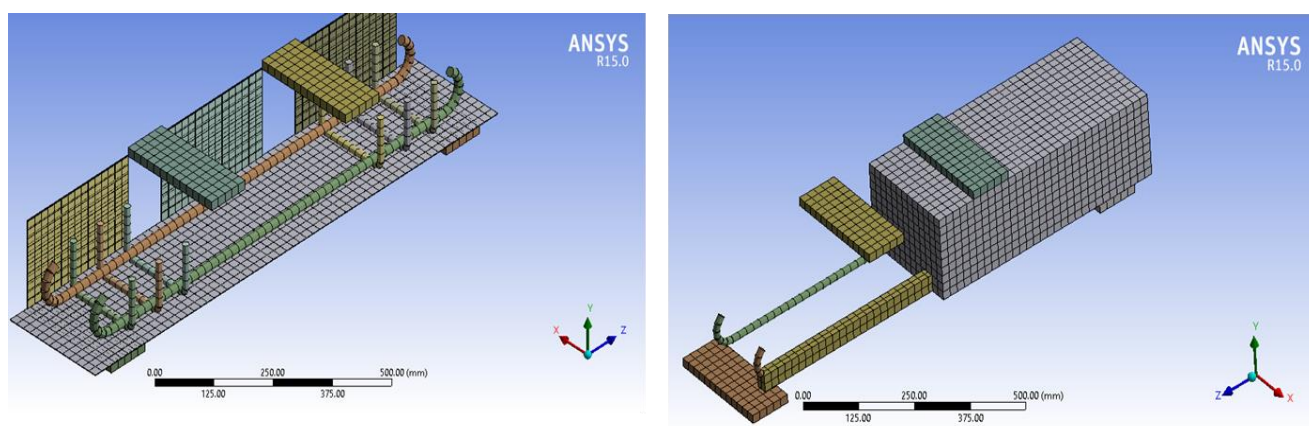


Рисунок 3.26 – Описание граничных условий моделей перемычек

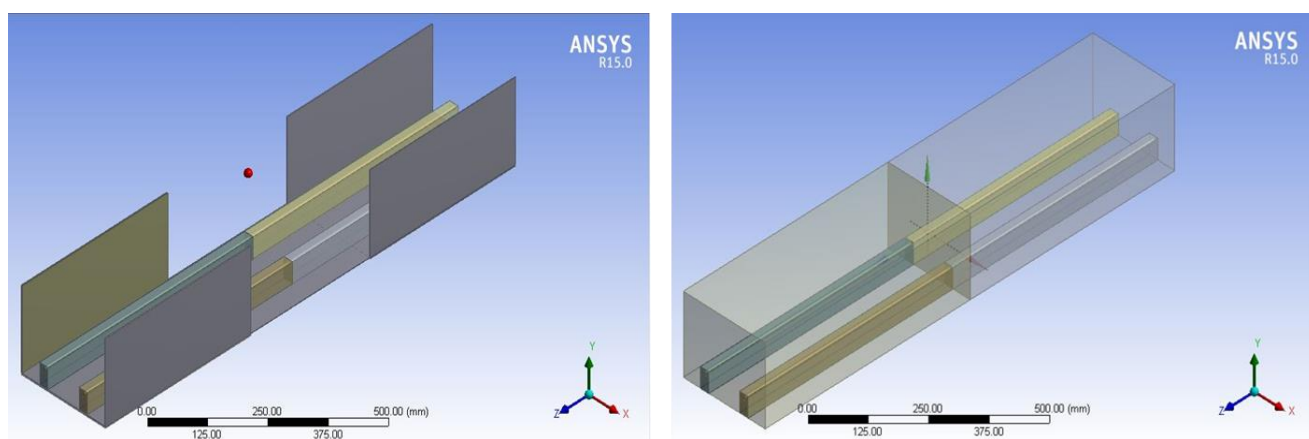


Рисунок 3.27 – Полное соединение между боковыми гранями газобетонных блоков, моделирование штробы

В расчете применялся неявный решатель дифференциальных уравнений. Нахождение решения нелинейной задачи итерационным методом касательных с автоматической оптимизацией шага. Итерационный решатель в ANSYS реализован методом обусловленных сопряженных градиентов. Контроль сходимости для нагрузки был задан величиной 2%.

В результате численного эксперимента получены изополя главных напряжений, деформаций, перемещений, представленные на рисунке 3.28. Рисунки отражают результаты, полученные при использовании 2-го типа взаимодействия поверхностей.

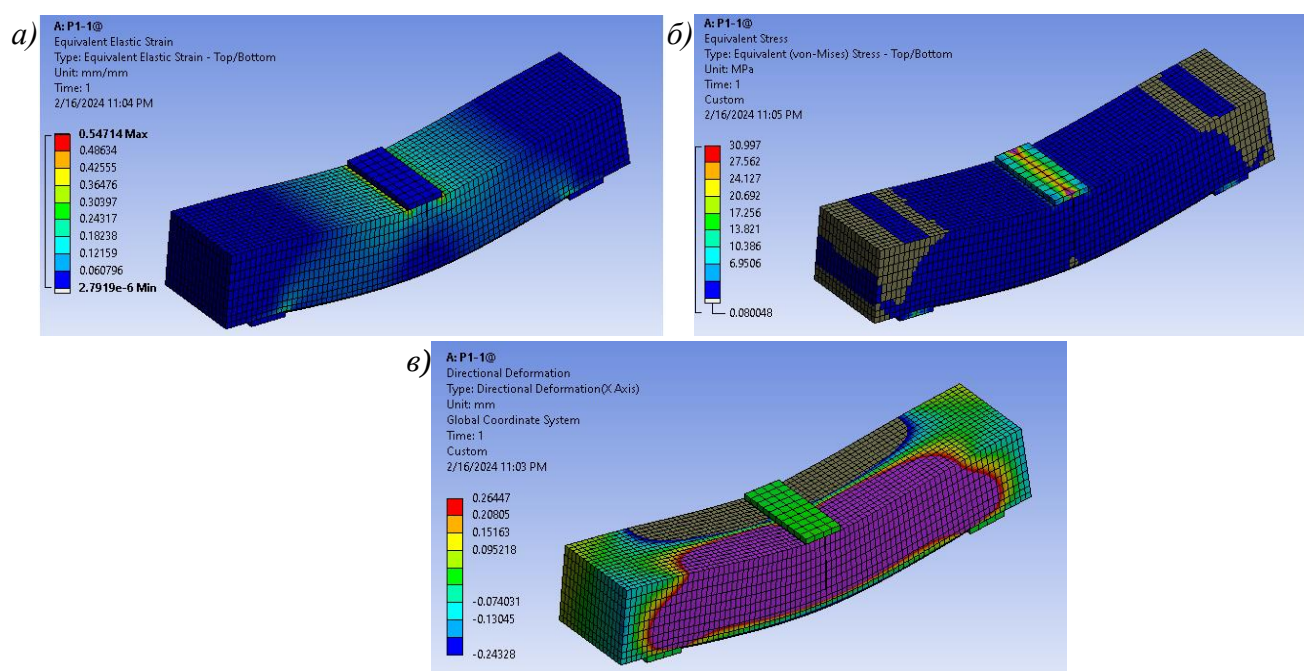


Рисунок 3.28 – Изополя образца П1-1: *а* – относительная деформация; *б* – напряжения; *в* – вертикальные перемещения

Результаты численного эксперимента при жестком сцеплении композита с газобетоном показали максимальное завышение величин несущей способности и жесткости образцов.

Результаты численного эксперимента при фрикционном соединении композита с газобетоном показали несколько меньшее завышение величин несущей способности и жесткости образцов.

3.2.1.5. Анализ экспериментальных и численных исследований изгибаемых газобетонных элементов

По результатам исследований выполнен сравнительный анализ данных, полученных автором при лабораторных испытаниях и численных расчетах.

Результаты сопоставления результатов экспериментальных исследований и результатов численных исследований приведены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Сравнение параметров работы под нагрузкой образцов

Наим-е образца	Относительная деформация ε_{max}		Напряжения σ_{max} , МПа		Вертикальные перемещения f_{max} , мм	
	эксперимент. данные	ANSYS	эксперимент. данные	ANSYS	эксперимент. данные	ANSYS
П1	0,000467	0,00057	1,45	1,49	0,20	0,23
П1-1	0,003399	0,0032	4,5	4,83	3,44	3,75
П1-1.1	0,004169	0,0040	5,38	5,40	4,971	5,15
П1-2	0,001867	0,0022	5,91	6,67	2,494	2,49
П1-3	0,003917	0,0012	8,23	7,32	2,129	2,78
П1-4	0,001382	0,0010	7,64	7,89	3,165	3,70
П1-5	0,005075	0,0040	9,51	11,11	6,723	5,95
П1-6	0,003373	0,00311	7,96	7,52	4,570	5,11

В результате исследований установлено, что на несущую способность усиленных изгибаемых газобетонных конструкций влияют следующие факторы:

- класс бетона усиливаемой конструкции (экспериментально не подтверждено);
- податливость шва контакта, т.е. погонный модуль сдвига клеевого шва;
- предыстория нагружения усиливаемой конструкции;
- распределение напряжений и деформаций по расчетному сечению усиленной конструкции, скорость их изменения при увеличении нагрузки;
- прочностные и деформационные характеристики внешнего армирования.

Несущая способность усиленных изгибаемых газобетонных конструкций увеличивается:

- при уменьшении податливости шва контакта;

- уменьшении уровня нагрузки в процессе эксплуатации усиливаемой конструкции в момент усиления;

- уменьшении количества и ширины раскрытия нормальных трещин;

Численный эксперимент показал, что усиление внешним армированием элементов, не подвергавшимся воздействию нагрузок, в значительной мере повышает их несущую способность и снижает деформативность. Анализ данных таблицы 3.6 позволяет сделать вывод об увеличении высоты сжатой зоны бетона при появлении внешнего армирования. Разрушение элементов происходит от нарушения совместной работы композита и газобетона конструкции вследствие достижения композитом предельных деформаций контактной зоны.

При армировании ненагруженных неповрежденных элементов наблюдается максимальный прирост несущей способности. Основным фактором отказа армированного элемента становится нарушение сцепления между газобетоном и внешним армированием с последующим отслоением. Рекомендуется применение анкерных устройств не только на торцах перемычек в приопорных зонах, но и в зоне действия максимальных изгибающих моментов. Это объясняется тем, что первые позволяют реализовать вантовый эффект в запредельной стадии работы внешнего армирования, создавая затяжку в растянутой зоне, а вторые – добиться увеличения предельных деформаций отслоения и препятствовать отделению внешнего армирования от газобетона.

Наиболее достоверным способом расчета таких конструкций является применение методики с учетом податливости соединения, а также расчет на основе моделирования в программной среде с податливым фрикционным клеевым швом.

3.2.2. Исследование теплозащитных свойств составных перемычек из газобетонных блоков

Поскольку для более точного прогнозирования показателей энергоэффективности необходимо учитывать армирование и заполнение сквозных и перевязочных швов стеновых конструкций, целесообразно определять

приведенное сопротивление теплопередачи конструкций с учетом линейных и точечных теплотехнических однородностей.

Оценка теплозащитных свойств стеновых конструкций является комплексным процессом, который включает в себя несколько методологических подходов. Одним из ключевых методов являются теплотехнические расчеты, которые позволяют анализировать теплопроводность материалов, оценивать теплопотери через стены и определять тепловой баланс конструкций.

Для оценки эффективности изоляции стен используется сравнение коэффициентов теплопроводности различных материалов, что позволяет выбрать наиболее подходящие варианты для строительства. Также применяются стандарты и нормативы, устанавливающие минимальные требования к теплоизоляции зданий и их конструкций.

Приведенное сопротивление теплопередаче газобетонных перемычек с учетом линейных и точечных теплотехнических однородностей рассчитывалось на разработанной программе [153] (приложение Е).

Приведенное сопротивление теплопередаче конструкции рассчитываемого фрагмента определяется по формуле (3.1) [154]:

$$R_o^r = \sum A_i / (\sum A_i / R_{o,i} + \sum L_j \psi_j + \sum N_k K_k) \quad (3.1)$$

где A_i – площадь конструкции i -го вида в рассматриваемом фрагменте, м^2 ; $R_{o,i}$ – сопротивление теплопередаче однородной части конструкции i -го вида, $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$; L_j – протяженность всех стыков j -го вида в рассматриваемом фрагменте, м ; ψ_j – дополнительные удельные линейные потери теплоты через стык j -го вида, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$; N_k – число точечных теплотехнических неоднородностей k -го вида в рассматриваемом фрагменте, шт.; K_k – дополнительные удельные потери теплоты через точечную теплотехническую неоднородность k -го вида, $\text{Вт}/^\circ\text{C}$.

Сопротивление теплопередаче однородной части конструкции i -го вида определялось по формуле (3.2):

$$R_o = R_{si} + R_{se} + R_k \quad (3.2)$$

где $R_{si} = 1/\alpha_{int}$; α_{int} – коэффициент теплообмена внутренней поверхности ограждающих конструкций, Вт/(м²·°C), принимаемый для стен равным 8,7, для окон – 8,0 Вт/(м²·°C); $R_{se} = 1/\alpha_{ext}$; α_{ext} – коэффициент теплообмена наружной поверхности ограждающих конструкций для условий холодного периода, Вт/(м²·°C), принимаемый для наружных стен равным 23,0, для стен, выходящих в более холодные помещения, – 6,0 Вт/(м²·°C); R_k – термическое сопротивление одно- или многослойной ограждающей конструкции, (м²·°C)/Вт.

Дополнительные удельные линейные теплотери через стык j -го вида определялись по формуле (3.3):

$$\psi_j = \Delta Q_j^L / (t_{int} - t_{ext}) \quad (3.3)$$

где t_{int} – расчетная температура воздуха со стороны внутренней поверхности конструкции, для расчета принимаемая равной +20 °C; t_{ext} – расчетная температура воздуха со стороны наружной поверхности конструкции, для расчета принимаемая равной -10 °C; ΔQ_j^L – дополнительные потери теплоты через стык j -го вида, приходящиеся на один погонный метр стыка, Вт/м, определяемые по формуле (3.4):

$$\Delta Q_j^L = Q_j^L - Q_{j1} - Q_{j2} \quad (3.4)$$

где Q_j^L – потери теплоты через стык j -го вида, приходящиеся на один погонный метр стыка, являющиеся результатом расчета температурного поля, принимаемыми для расчета равными 0,266 Вт/м; Q_{j1} , Q_{j2} – потери теплоты через участок однородного заполнения, вошедший в расчетную область при расчете температурного поля стыка j -го вида, Вт/м, определяемые по формулам (3.5) и (3.6):

$$Q_{j1} = [(t_{int} - t_{ext})/R_{o,j1} \cdot l] A_{j1} \quad (3.5)$$

$$Q_{j2} = [(t_{int} - t_{ext})/R_{o,j2} \cdot l] A_{j2} \quad (3.6)$$

где l – протяженность расчетной области при расчете двухмерного температурного поля в направлении, перпендикулярном к сечению, равная 1 м; A_{j1} , A_{j2} – площадь однородных заполнений, вошедших в расчетную область при

расчете температурного поля, м^2 . При этом сумма величин $A_{j1} + A_{j2}$ равна площади расчетной области при расчете температурного поля; $R_{o,j1}$, $R_{o,j2}$ – сопротивления теплопередаче первого и второго участков, образующих стык фрагмента, $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$.

3.2.2.1. Определение приведенного сопротивления теплопередаче армированных газобетонных перемычек

С использованием разработанной программы [153] (приложение Ж) определено приведенное сопротивление теплопередачи армированных газобетонных перемычек с учетом линейных и точечных теплотехнических однородностей.

Для расчета рассматриваются фрагмент перемычки газобетонной составной, армированной одним стержнем (рисунок 3.29, а), фрагмент перемычки, армированной двумя стержнями (рисунок 3.29, б), фрагмент перемычки, армированной лентами из углеродных волокон по шву (рисунок 3.29, в), фрагмент перемычки, армированной одним стержнем и лентами из углеродных волокон по шву (рисунок 3.29, г), фрагмент перемычки, армированной двумя стержнями и лентами из углеродных волокон по шву (рисунок 3.29, д), площадью 1 м^2 каждый. Рассматриваемые перемычки состоят из газобетонных блоков $D500$ размером $200 \times 300 \times 600 \text{ мм}$. Блоки соединены по торцевым сторонам полиуретановым клеем толщиной 1 мм . Стержневое армирование производится стальными либо композитными стержнями диаметром 10 мм . Ленты из углеродных волокон, прикрепленные с нижней стороны составной газобетонной перемычки, в расчете не учитывались, так как находятся вне тела газобетонных блоков и их влияние на сопротивление теплопередаче и продуваемость конструкции отсутствует. Ширина лент, прикрепленных к ложковым сторонам блоков в местах вертикальных швов для всех типов составных перемычек, составляет 400 мм .

Также в рамках исследования рассматриваются армированная сплошная перемычка из газобетона маркой по средней плотности $D500$ (рисунок 3.29, е),

перемычка из U-образных блоков (рисунок 3.29, *ж*) с расположенной в выемке арматурным каркасом, залитым бетоном марки М100.

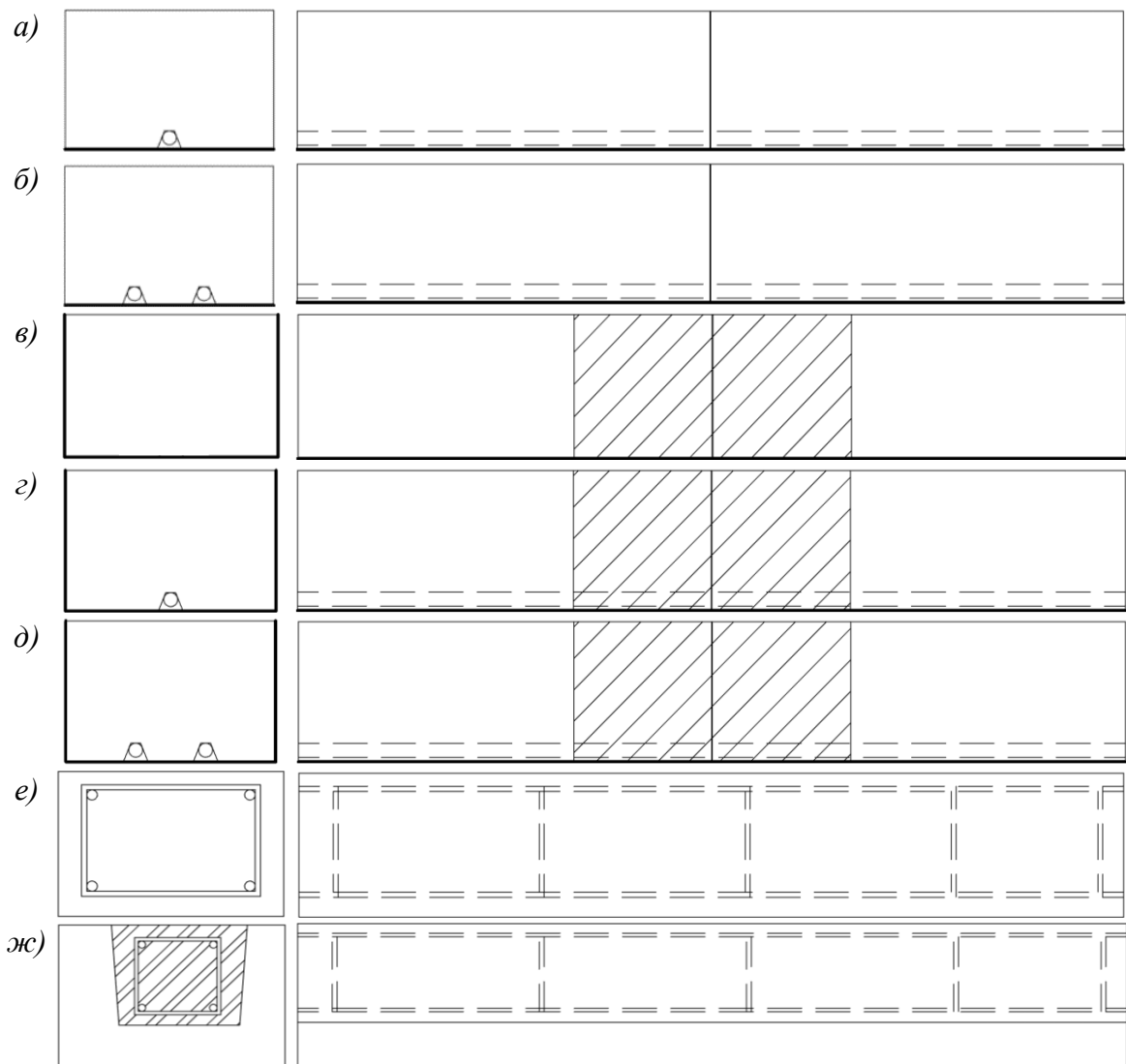


Рисунок 3.29 – Поперечный разрез и общий вид фрагментов составных перемычек из газобетонных блоков для определения приведенного сопротивления теплопередаче:
а – перемычка, армированная одним стержнем; *б* – перемычка, армированная двумя стержнями; *в* – перемычка, армированная лентами из углеродных волокон по шву; *г* – перемычка, армированная одним стержнем и лентами из углеродных волокон по шву; *д* – перемычка, армированная двумя стержнями и лентами из углеродных волокон по шву; *е* – армированная газобетонная сплошная перемычка; *ж* – армированная перемычка из U-образных блоков

Рассматриваемые фрагменты перемычек представлены следующими видами однородной части конструкции:

- участок газобетонного блока;
- участок вертикального сквозного шва на полиуретановом клее;

- участок стержневого армирования в виде газобетонного блока со встроенным в него арматурными стержнями;
- участок внешнего полосового армирования в виде газобетонного блока с лентой из углеродных волокон, прикрепленной к ложковой стороне блока;
- участок выемки перемычки из U-образных блоков, состоящей из стенок из газобетона, арматурного каркаса из стальных стержней и залитого в выемку тяжелого бетона;
- участок выемки перемычки из U-образных блоков, состоящей из стенок из газобетона и залитого в выемку тяжелого бетона [155].

Приведенное сопротивление теплопередаче конструкции рассчитываемого фрагмента определяется по формуле (3.1) [154].

Поскольку точечные теплотехнические однородности в рассматриваемых конструкциях отсутствуют, показатели N_k и $K_k = 0$.

Определяется приведенное сопротивление теплопередаче фрагмента газобетонной перемычки, армированной одним стержнем, фрагмента перемычки, армированной двумя стержнями, фрагмента перемычки, армированной лентами из углеродных волокон по шву, фрагмента перемычки, армированной одним стержнем и лентами из углеродных волокон по шву, фрагмента перемычки, армированной двумя стержнями и лентами из углеродных волокон по шву, фрагмента армированной сплошной перемычки и фрагмента армированной перемычки из U-образных блоков. Дополнительные удельные линейные потери теплоты через стык j -го вида рассматриваемых фрагментов представлен на рисунке 3.30.

Из данных, представленных на рисунке 3.30, видно, что максимальные дополнительные удельные потери теплоты у фрагментов перемычек без внешнего полосового армирования, поскольку ленты из углеродных волокон, прикрепленные к газобетонным блокам в местах вертикальных швов снижают продуваемость составной конструкции. Наименьшее значение дополнительных удельных потерь теплоты у перемычки, армированной лентами из углеродных волокон, что указывает на влияние стержневого армирования на

теплотехническую однородность конструкции несмотря на то, что армирование стальными и стеклокомпозитными стержнями имеют различные показатели теплопроводности.

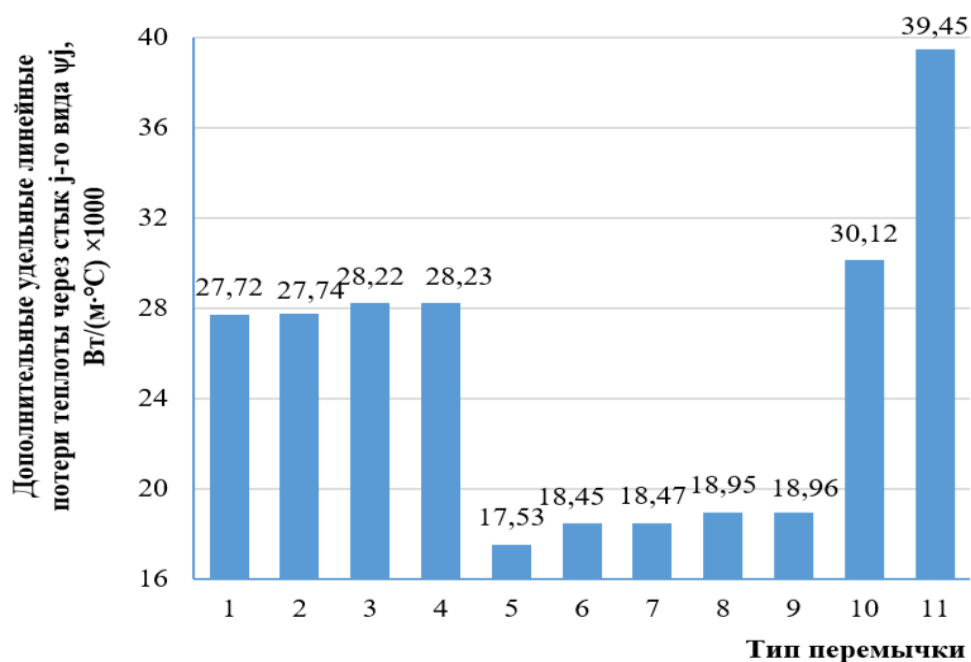


Рисунок 3.30 – Дополнительные удельные линейные потери теплоты через стык j -го вида фрагментов перемычек: 1 – перемычка с одним стальным стержнем; 2 – то же с одним стеклокомпозитным стержнем; 3 – то же с двумя стальными стержнями; 4 – то же с двумя стеклокомпозитными стержнями; 5 – то же с лентами из углеродных волокон по шву; 6 – то же с одним стальным стержнем и лентами из углеродных волокон по шву; 7 – то же с одним стеклокомпозитным стержнем и лентами из углеродных волокон по шву; 8 – то же с двумя стальными стержнями и лентами из углеродных волокон по шву; 9 – то же с двумя стеклокомпозитными стержнями и лентами из углеродных волокон по шву; 10 – армированная сплошная перемычка; 11 – составная перемычка из U-образных блоков

Также следует отметить, что фрагменты перемычек с идентичным типом армирования имеют практически равные удельные потери теплоты, что указывает на то, что на теплотехническую однородность влияет соотношение площадей однородных частей конструкции.

Составная перемычка из U-образных блоков имеет наибольшие дополнительные удельные потери теплоты, поскольку конструкция данной перемычки содержит однородную часть конструкции, представленную в виде выемки с арматурным каркасом, заполненной тяжелым бетоном, достаточно большой площади, за счет чего увеличивается протяженность стыков однородных частей конструкции, способствующих потере теплоты.

На рисунке 3.31 представлены результаты исследования приведенного сопротивления теплопередаче фрагментов перемычек.

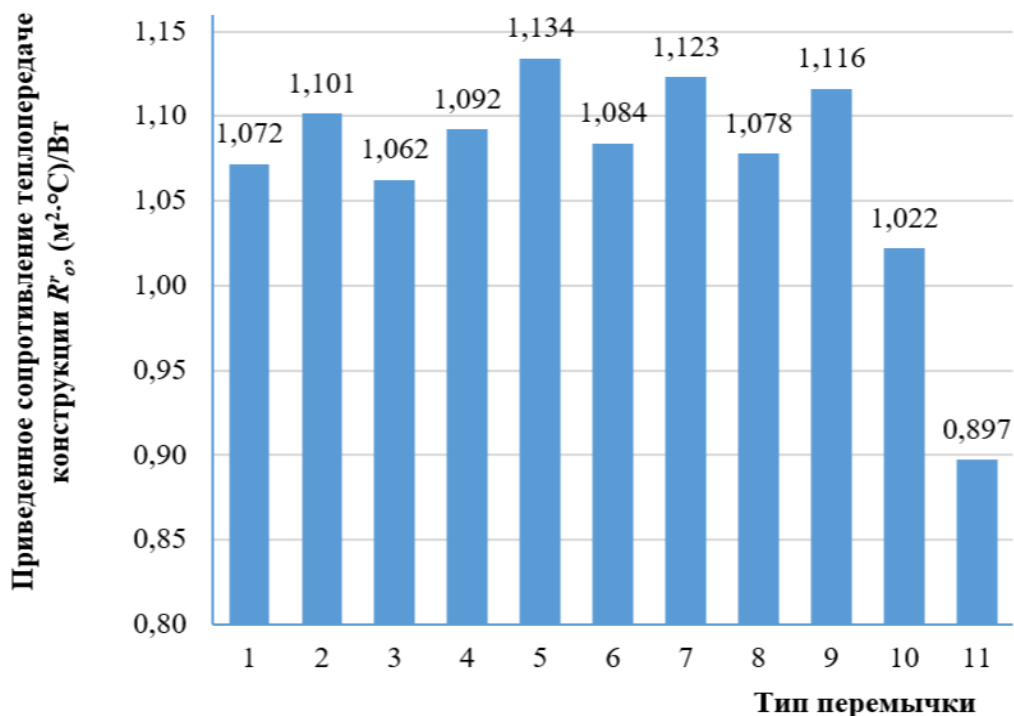


Рисунок 3.31 – Приведенное сопротивление теплопередаче фрагментов перемычек: 1 – перемычка с одним стальным стержнем; 2 – то же с одним стеклокомпозитным стержнем; 3 – то же с двумя стальными стержнями; 4 – то же с двумя стеклокомпозитными стержнями; 5 – то же с лентами из углеродных волокон по шву; 6 – то же с одним стальным стержнем и лентами из углеродных волокон по шву; 7 – то же с одним стеклокомпозитным стержнем и лентами из углеродных волокон по шву; 8 – то же с двумя стальными стержнями и лентами из углеродных волокон по шву; 9 – то же с двумя стеклокомпозитными стержнями и лентами из углеродных волокон по шву; 10 – армированная сплошная перемычка; 11 – составная перемычка из U-образных блоков

Приведенное сопротивление теплопередаче фрагментов составных перемычек, армированных стальными либо композитными стержнями без применения внешнего полосового армирования, зависит непосредственно от количества стержней в газобетонном блоке (рисунок 3.31). При этом материал арматурного стержня незначительно влияет на приведенное сопротивление теплопередаче перемычки.

Результаты исследования теплопроводности составных газобетонных перемычек представлены на рисунке 3.32.

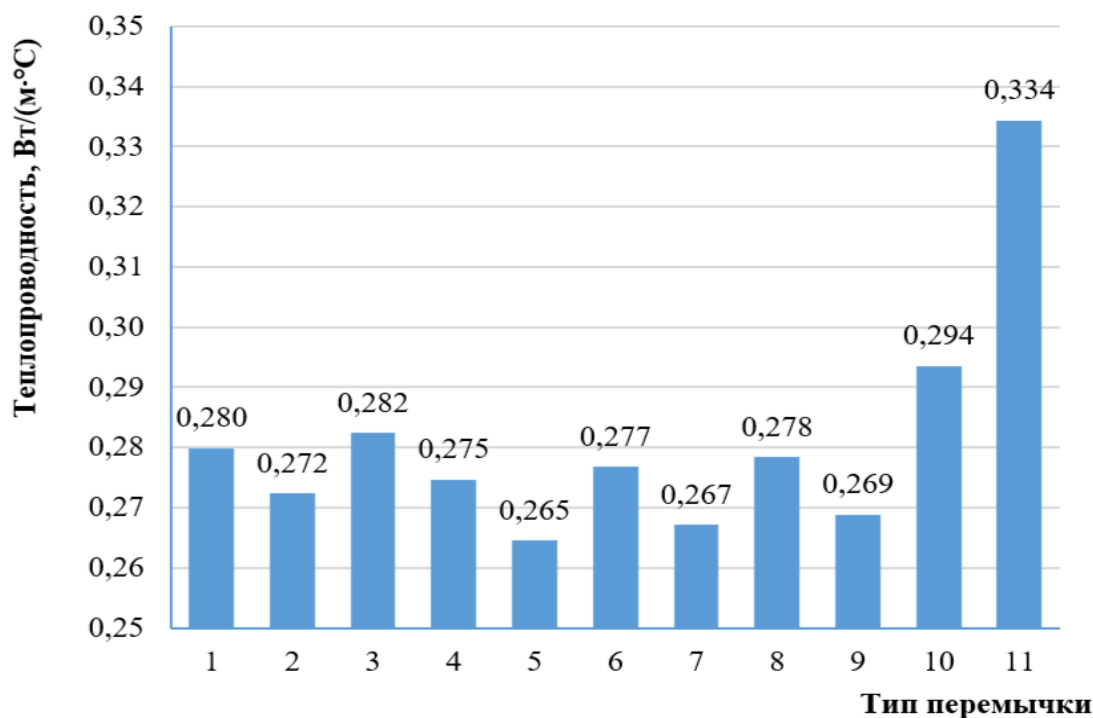


Рисунок 3.32 – Теплопроводность фрагментов перемычек: 1 – перемычка с одним стальным стержнем; 2 – то же с одним стеклокомпозитным стержнем; 3 – то же с двумя стальными стержнями; 4 – то же с двумя стеклокомпозитными стержнями; 5 – то же с лентами из углеродных волокон по шву; 6 – то же с одним стальным стержнем и лентами из углеродных волокон по шву; 7 – то же с одним стеклокомпозитным стержнем и лентами из углеродных волокон по шву; 8 – то же с двумя стальными стержнями и лентами из углеродных волокон по шву; 9 – то же с двумя стеклокомпозитными стержнями и лентами из углеродных волокон по шву; 10 – армированная сплошная перемычка; 11 – составная перемычка из U-образных блоков

Из данных, представленных на рисунках 3.31 и 3.32, следует, что стержневое армирование как теплопроводное включение снижает теплотехнические характеристики исследуемых конструкций. При этом армирование стальными стержнями снижает теплозащитные свойства перемычек на 3-6 % по сравнению со стержневым армированием стеклокомпозитной арматурой в связи с высокой теплопроводностью стали. Наиболее теплоэффективным типом армирования перемычек является внешнее полосовое армирование лентами из углеродных волокон, поскольку показатели приведенного сопротивления теплопередаче на 5-8 % показателей составных перемычек с другим типом армирования. Однако в случае необходимости повышения прочностных характеристик составной перемычки за счет устройства стержневого армирования в тело газобетонных

блоков следует применять стеклокомпозитную арматуру с высокими показателями теплозащиты.

По отношению к сплошной армированной перемычке у составной перемычки из газобетонных блоков, армированной лентами из углеродных волокон по шву, показатели теплопроводности ниже на 11 %; по отношению к составной перемычке из U-образных блоков – на 26 % за счет отсутствия теплопроводных включений в виде арматурного каркаса и тяжелого бетона в теле перемычки.

Таким образом, внешнее армирование в виде ленты из углеродных волокон, жестко прикрепленной с нижней стороны составной газобетонной перемычки по всей ее площади с направлением волокон параллельно продольной оси, обеспечивает необходимые прочностные характеристики, соответствующие требованиям к ячеистобетонным перемычкам, при этом сохраняя ее теплоизоляционные свойства. Применение полиуретанового клея для заполнения вертикальных швов по краям составной перемычки обусловлено его низкой теплопроводностью и совместимостью с ячеистым бетоном, что способствует повышению эффективности данной конструкции.

Отдельные части ленты из углеродных волокон, закрепленные к боковым сторонам брусковых элементов в местах вертикальных швов, помимо усиления сдвиговой жесткости таких швов, снижают проницаемость воздуха через составную перемычку, улучшая ее теплоизоляционные свойства.

Наиболее теплоэффективным типом армирования перемычек является внешнее полосовое армирование лентами из углеродных волокон, поскольку показатели приведенного сопротивления теплопередаче на 5-8 % выше показателей аналогичных перемычек с другим типом армирования, и на 11-26 % выше показателей традиционно применяемых перемычек (армированной сплошной перемычки и составной перемычки из U-образных блоков).

3.2.2.2. Определение приведенного сопротивления теплопередаче составной перемычки из газобетонных блоков в составе ограждающей конструкции

Согласно [154] определено приведенное сопротивление теплопередачи участков стеновой конструкции из газобетонных блоков с различным перекрытием оконного проема с учетом линейных и точечных теплотехнических однородностей.

Для расчета рассматриваются фрагмент стены с перемычкой, армированной одним стержнем, фрагмент стены с перемычкой, армированной двумя стержнями, фрагмент стены с перемычкой, армированной лентами из углеродных волокон по шву, фрагмент стены с перемычкой, армированной одним стержнем и лентами из углеродных волокон по шву, фрагмент стены с перемычкой, армированной двумя стержнями и лентами из углеродных волокон по шву, площадью 6 м² каждый. Рассматриваемые кладки состоят из газобетонных блоков *D500* размером 200×300×600 мм. Блоки соединены по торцевым сторонам полиуретановым клеем толщиной 1 мм. Стержневое армирование производится стальными либо композитными стержнями диаметром 10 мм. Ленты из углеродных волокон, прикрепленные с нижней стороны составной газобетонной перемычки, в расчете не учитывались, т.к. находятся вне тела газобетонных блоков и их влияние на сопротивление теплопередаче и продуваемость конструкции отсутствует.

Также в рамках исследования рассматриваются фрагмент стены со сплошной перемычкой из газобетона маркой по средней плотности *D500*, фрагмент стены с перемычкой из U-образных блоков с расположенной в выемке арматурным каркасом, залитым бетоном марки М100.

Рассматриваемые фрагменты перемычек представлены следующими видами однородной части конструкции:

- участок газобетонного блока;
- участок вертикального сквозного шва на полиуретановом клее;
- участок стержневого армирования в виде газобетонного блока со встроенным в него арматурными стержнями;

- участок внешнего полосового армирования в виде газобетонного блока с лентой из углеродных волокон, прикрепленной к ложковой стороне блока;
- участок выемки перемычки из U-образных блоков, состоящей из стенок из газобетона, арматурного каркаса из стальных стержней и залитого в выемку тяжелого бетона;
- участок выемки перемычки из U-образных блоков, состоящей из стенок из газобетона и залитого в выемку тяжелого бетона.

Приведенное сопротивление теплопередаче конструкции рассчитываемого фрагмента определяется по формуле (3.1) [154].

Поскольку точечные теплотехнические однородности в рассматриваемых конструкциях отсутствуют, показатели N_k и $K_k = 0$.

Определяется приведенное сопротивление теплопередаче фрагмента стены с перемычкой, армированной одним стержнем, фрагмента стены с перемычкой, армированной двумя стержнями, фрагмента стены с перемычкой, армированной лентами из углеродных волокон по шву, фрагмента стены с перемычкой, армированной одним стержнем и лентами из углеродных волокон по шву, фрагмента стены с перемычкой, армированной двумя стержнями и лентами из углеродных волокон по шву, фрагмента стены с армированной сплошной перемычкой и фрагмент стены с армированной перемычкой из U-образных блоков. Дополнительные удельные линейные потери теплоты через стык j -го вида рассматриваемых фрагментов представлены на рисунке 3.33.

Из данных, представленных на рисунке 3.33, видно, что максимальные дополнительные удельные потери теплоты у фрагментов стен с перемычками без внешнего полосового армирования, поскольку ленты из углеродных волокон, прикрепленные к газобетонным блокам в местах вертикальных швов перемычки, снижают продуваемость составной конструкции.

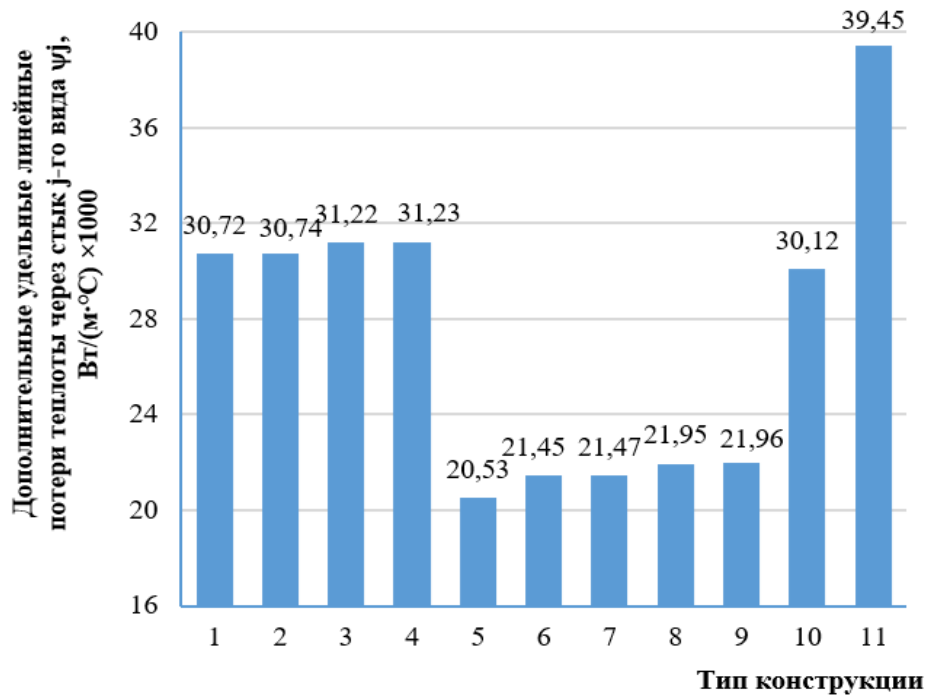


Рисунок 3.33 – Дополнительные удельные линейные потери теплоты через стык j -го вида фрагментов стен: 1 – стена с перемычкой с одним стальным стержнем; 2 – то же с одним стеклокомпозитным стержнем; 3 – то же с двумя стальными стержнями; 4 – то же с двумя стеклокомпозитными стержнями; 5 – то же с лентами из углеродных волокон по шву; 6 – то же с одним стальным стержнем и лентами из углеродных волокон по шву; 7 – то же с одним стеклокомпозитным стержнем и лентами из углеродных волокон по шву; 8 – то же с двумя стальными стержнями и лентами из углеродных волокон по шву; 9 – то же с двумя стеклокомпозитными стержнями и лентами из углеродных волокон по шву; 10 – стена с армированной сплошной перемычкой; 11 – стена с составной перемычкой из U-образных блоков

Наименьшее значение дополнительных удельных потерь теплоты у фрагмента стен с перемычкой, армированной лентами из углеродных волокон, что указывает на влияние стержневого армирования на теплотехническую однородность конструкции несмотря на то, что армирование стальными и стеклокомпозитными стержнями имеют различные показатели теплопроводности.

Также следует отметить, что фрагменты стен с перемычками с идентичным типом армирования имеют практически равные удельные потери теплоты, что указывает на то, что на теплотехническую однородность влияет соотношение площадей однородных частей конструкции.

Стена с составной перемычкой из U-образных блоков имеет наибольшие дополнительные удельные потери теплоты, поскольку конструкция данной

перемычки содержит однородную часть конструкции, представленную в виде выемки с арматурным каркасом, заполненной тяжелым бетоном, достаточно большой площади, за счет чего увеличивается протяженность стыков однородных частей конструкции, способствующих потере теплоты.

На рисунке 3.34 представлены результаты исследования приведенного сопротивления теплопередаче фрагментов стен со стоимостью перемычки.

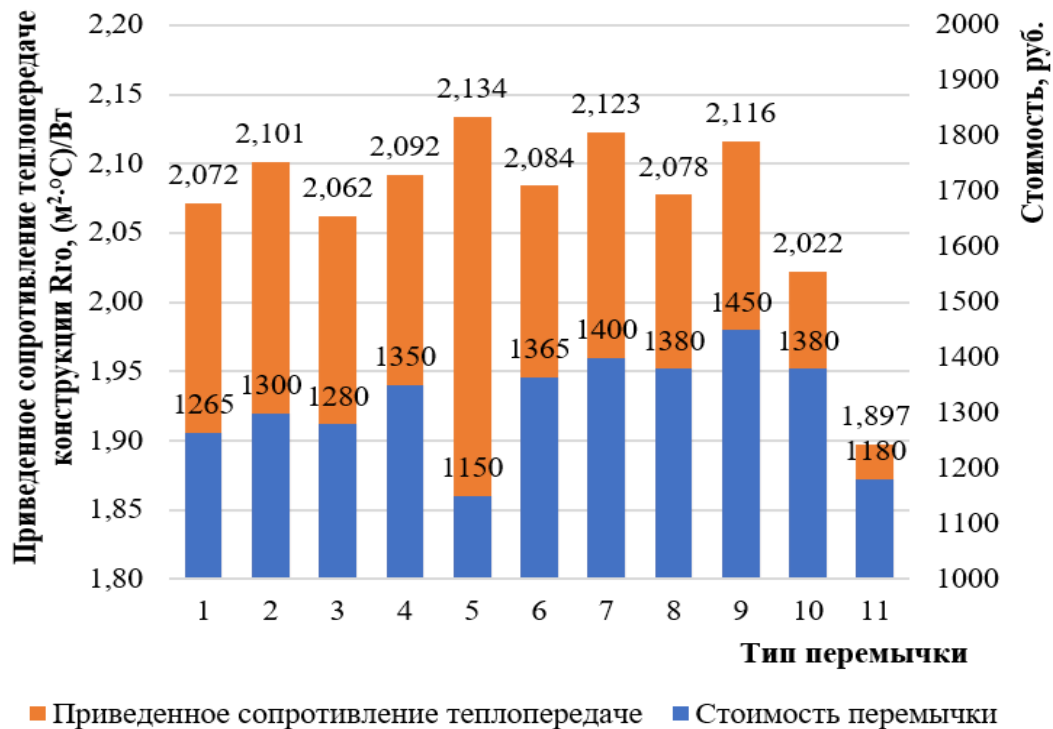


Рисунок 3.34 – Приведенное сопротивление теплопередаче фрагментов стен со стоимостью перемычки: 1 – стена с перемычкой с одним стальным стержнем; 2 – то же с одним стеклокомпозитным стержнем; 3 – то же с двумя стальными стержнями; 4 – то же с двумя стеклокомпозитными стержнями; 5 – то же с лентами из углеродных волокон по шву; 6 – то же с одним стальным стержнем и лентами из углеродных волокон по шву; 7 – то же с одним стеклокомпозитным стержнем и лентами из углеродных волокон по шву; 8 – то же с двумя стальными стержнями и лентами из углеродных волокон по шву; 9 – то же с двумя стеклокомпозитными стержнями и лентами из углеродных волокон по шву; 10 – стена с армированной сплошной перемычкой; 11 – стена с составной перемычкой из U-образных блоков

Приведенное сопротивление теплопередаче фрагментов стен с составными перемычками, армированными стальными либо композитными стержнями без применения внешнего полосового армирования, зависит непосредственно от количества стержней в газобетонном блоке (рисунок 3.34). При этом материал

арматурного стержня незначительно влияет на приведенное сопротивление теплопередаче перемычки. Экономическая эффективность на 20-25 % (рисунок 3.34) обусловлена меньшей трудоемкостью монтажа за счет отсутствия необходимости дополнительной обработки блоков в виде штраб и укладки в них арматуры, а также за счет отсутствия необходимости применения грузоподъемного оборудования.

Результаты исследования теплопроводности составных газобетонных перемычек представлены на рисунке 3.35.

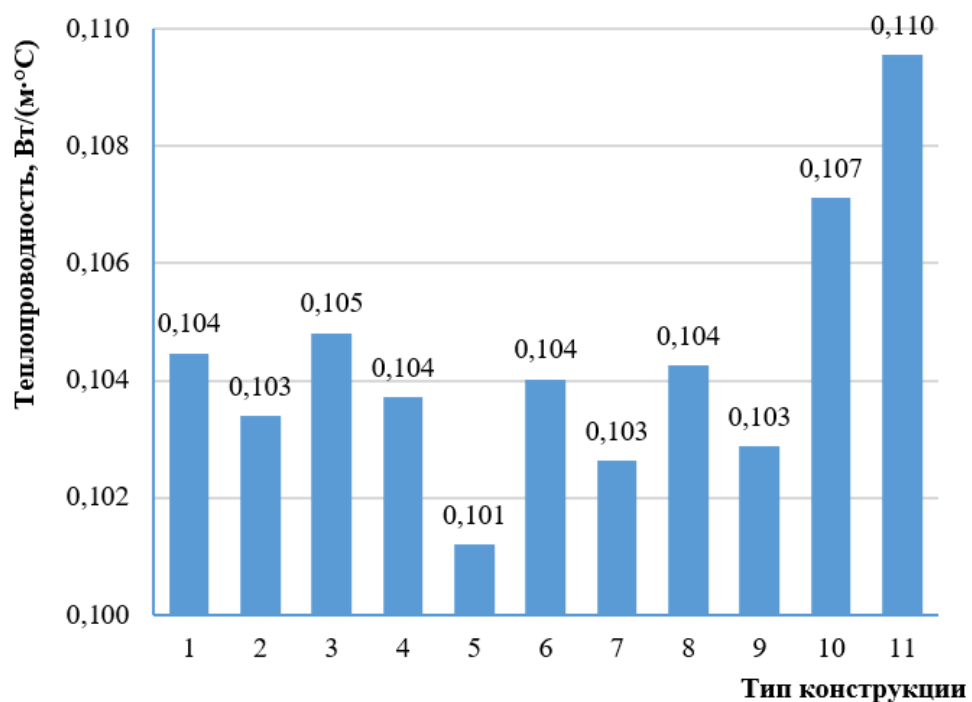


Рисунок 3.35 – Теплопроводность фрагментов стен: 1 – стена с перемычкой с одним стальным стержнем; 2 – то же с одним стеклокомпозитным стержнем; 3 – то же с двумя стальными стержнями; 4 – то же с двумя стеклокомпозитными стержнями; 5 – то же с лентами из углеродных волокон по шву; 6 – то же с одним стальным стержнем и лентами из углеродных волокон по шву; 7 – то же с одним стеклокомпозитным стержнем и лентами из углеродных волокон по шву; 8 – то же с двумя стальными стержнями и лентами из углеродных волокон по шву; 9 – то же с двумя стеклокомпозитными стержнями и лентами из углеродных волокон по шву; 10 – стена с армированной сплошной перемычкой; 11 – стена с составной перемычкой из U-образных блоков

Из данных, представленных на рисунках 3.34 и 3.35, следует, что стержневое армирование как теплопроводное включение в теле перемычки снижает теплотехнические характеристики исследуемых конструкций. Наиболее

теплоэффективным типом армирования перемычек в стеновой конструкции является внешнее полосовое армирование лентами из углеродных волокон, поскольку показатели приведенного сопротивления теплопередаче на 5 % показателей составных перемычек с другим типом армирования.

По отношению к стене со сплошной армированной перемычкой у стены с составной перемычкой из газобетонных блоков, армированной лентами из углеродных волокон по шву, показатели теплопроводности выше на 8 %; по отношению к составной перемычке из U-образных блоков – на 11 % за счет отсутствия теплопроводных включений в виде арматурного каркаса и тяжелого бетона в теле перемычки.

Таким образом, исследования приведенного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций из газобетонных блоков показывают, что высокая энергоэффективность кладки из газобетонных блоков при анализе теплоизоляционных свойств внешней стеновой конструкции значительно снижается за счёт наличия перемычек для оконных и дверных проёмов, характеризующихся повышенными значениями коэффициента теплопроводности.

Кроме того, показатели теплоизоляции изменяются в зависимости от типа перемычки и материалов, из которых они изготовлены. Моделирование показывает, что сплошные газобетонные перемычки и U-образные газобетонные блоки обладают более высокими значениями коэффициента теплопроводности по сравнению с составными перемычками.

3.2.2.3. Компьютерное моделирование ограждающей конструкции из газобетонных блоков

С целью сравнения теоретических данных о теплозащитных показателях стеновой конструкции построена модель участка стены из газобетонных блоков с оконным проемом для г. Аль-Рамади (Ирак) и г. Белгород (Россия). В качестве

исходных данных для определения теплопотерь приняты данные о температуре наружного воздуха за 2023 год. Температурные поля участков стен для г. Аль-Рамади приведены на рисунке 3.36.

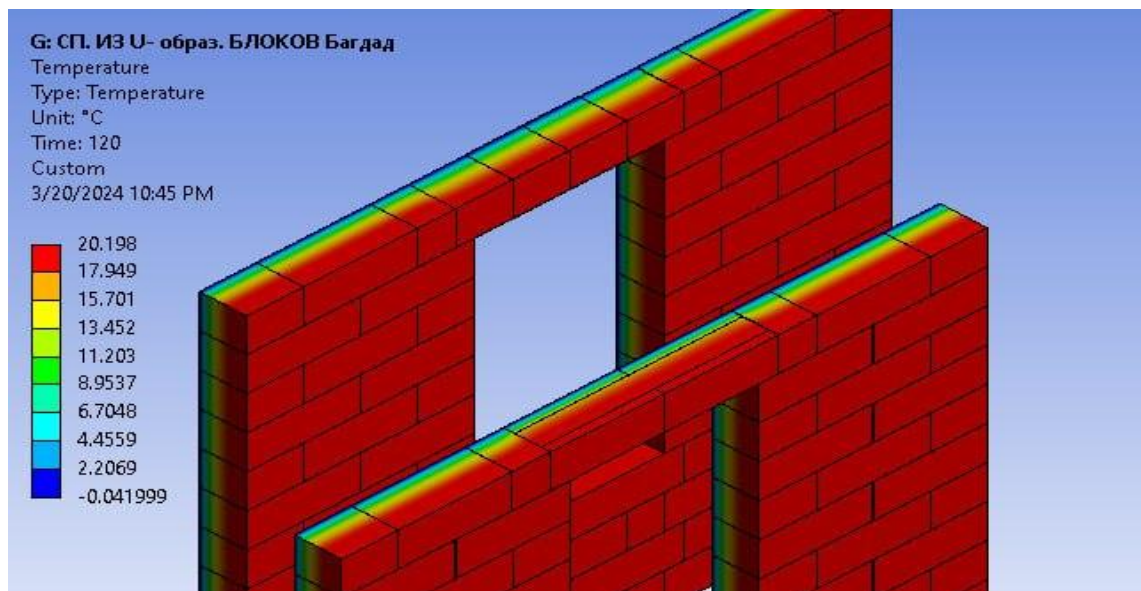


Рисунок 3.36 – Температурные поля участков стен для г. Аль-Рамади

Из моделированной конструкции, представленной на рисунке 3.36, ограждающей стеновой структуры из газобетонных блоков в городе Аль-Рамади с учетом граничных условий (температура внутреннего воздуха – 20°C ; температура наружного воздуха – 0°C), можно сделать вывод, что характеристики теплозащиты составной газобетонной перемычки практически эквивалентны характеристикам газобетонных стеновых блоков, несмотря на наличие оконного проема. Однако газобетонная составная перемычка из U-образных блоков, содержащая в себе тяжелый бетон и армированный каркас, демонстрирует минимальные значения теплозащитных характеристик из-за особенностей своего состава.

Из представленной модели участков стен, изображенной на рисунке 3.37, ограждающая стеновая конструкция из газобетонных блоков в городе Белгороде, сопоставленная с граничными условиями (температура внутреннего воздуха – 20°C ; температура наружного воздуха – -26°C), показывает, что, несмотря на наличие оконного проема, составная перемычка из газобетонных блоков имеет сопоставимое значение дополнительных удельных потерь теплоты с остальными

стенowymi элементами из газобетонных блоков. Однако составная перемычка из U-образных блоков обнаруживает наибольшие значения дополнительных удельных потерь теплоты по сравнению с остальными элементами стеновой конструкции из газобетонных блоков.

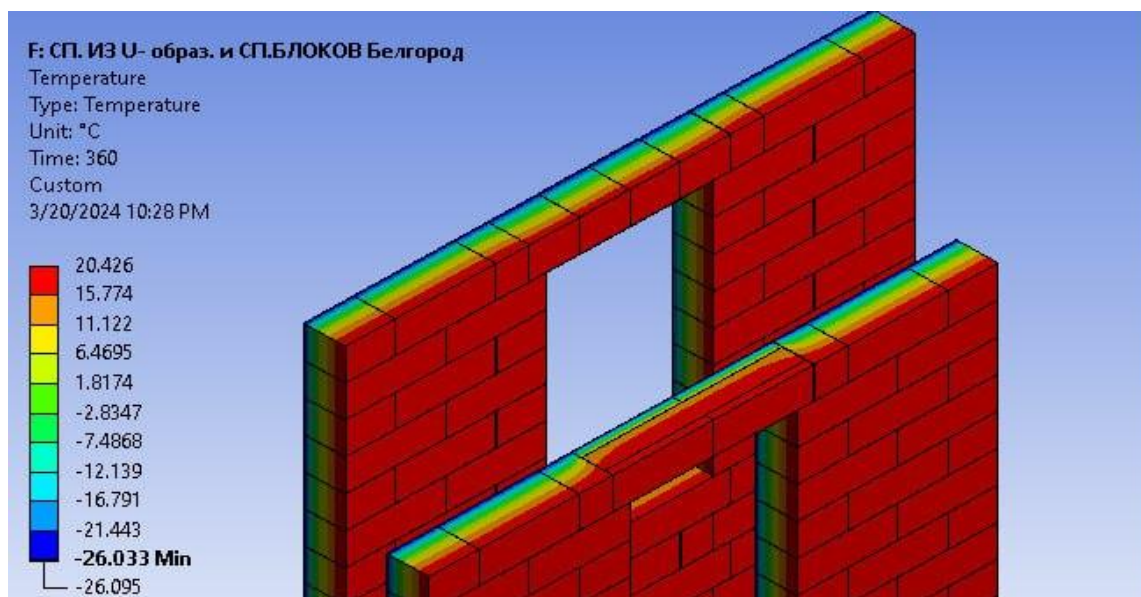


Рисунок 3.37 – Температурные поля участков стен для г. Белгород

Анализ результатов моделирования, представленных на рисунках 3.36 и 3.37, показывает, что составная перемычка из газобетонных блоков, усиленная внешним полосовым армированием, обладает высокой теплоизоляцией благодаря тому, что лента из углеродного волокна находится вне тела составной перемычки и не создает тепловых мостов. Кроме того, участки ленты, изготовленные из углеродных волокон и жестко закрепленные к боковым сторонам элементов составной перемычки в местах вертикальных швов с использованием полиуретанового клея, не только увеличивают сдвиговую жесткость швов, но и снижают продуваемость составной перемычки.

С другой стороны, теплопотери через ограждающие стеновые конструкции из газобетонных блоков в г. Аль-Рамади оказываются менее значительными, чем в г. Белгороде, в связи с меньшей разницей между внутренней и наружной температурой, что приводит к увеличению значения приведенного сопротивления теплопередаче.

3.2.3. Оценка степени эффективности применения составных газобетонных перемычек

Для оценки степени эффективности применения составных перемычек из газобетонных блоков в качестве перекрытия оконных и дверных проемов в ограждающих конструкциях зданий определен показатель эффективности (P_9), основанный на совокупной зависимости показателей прочности, теплоэффективности и стоимости. Показатели эффективности составных газобетонных перемычек приведены на рисунке 3.38.

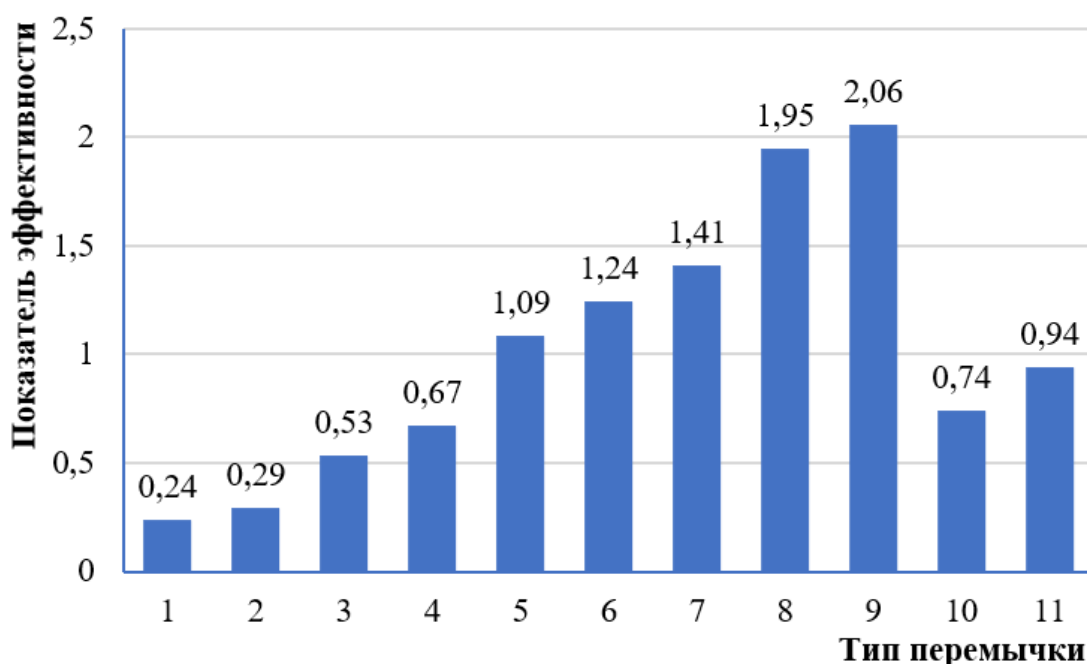


Рисунок 3.38 – Показатели эффективности составных перемычек: 1 – перемычка с одним стальным стержнем; 2 – то же с одним стеклокомпозитным стержнем; 3 – то же с двумя стальными стержнями; 4 – то же с двумя стеклокомпозитными стержнями; 5 – то же с лентами из углеродных волокон по шву; 6 – то же с одним стальным стержнем и лентами из углеродных волокон по шву; 7 – то же с одним стеклокомпозитным стержнем и лентами из углеродных волокон по шву; 8 – то же с двумя стальными стержнями и лентами из углеродных волокон по шву; 9 – то же с двумя стеклокомпозитными стержнями и лентами из углеродных волокон по шву; 10 – армированная сплошная перемычка; 11 – составная перемычка из U-образных блоков

На основании полученных расчетно-экспериментальных данных произведено ранжирование составных перемычек по степени эффективности их использования в качестве перекрытия оконных и дверных проемов в ограждающих конструкциях зданий по физико-механическим и экономическим

критериям. По совокупности факторов установлена последовательность повышения эффективности применения в контексте снижения теплопотерь через ограждающие конструкции при обеспечении требуемой прочности и низкой стоимости: перемычка с одним стальным стержнем → перемычка с одним стеклокомпозитным стержнем → перемычка с двумя стальными стержнями → перемычка с двумя стеклокомпозитными стержнями → армированная сплошная перемычка → составная перемычка из U-образных блоков → перемычка с лентами из углеродных волокон по шву → перемычка с одним стальным стержнем и лентами из углеродных волокон по шву → перемычка с одним стеклокомпозитным стержнем и лентами из углеродных волокон по шву → перемычка с двумя стальными стержнями и лентами из углеродных волокон по шву → перемычка с двумя стеклокомпозитными стержнями и лентами из углеродных волокон по шву. Для дальнейших исследований были приняты перемычка с двумя стеклокомпозитными стержнями и лентами из углеродных волокон по шву и перемычка с двумя стальными стержнями и лентами из углеродных волокон по шву.

3.3. Выводы по третьей главе

1. Проведен анализ достоверности имеющихся эмпирических данных, предназначенных для формирования базы данных для обучения моделей ИНС. Целью данного анализа является прогнозирование тепловых потерь через ограждающие конструкции из газобетонных блоков.

2. Получены экспериментальные данные по прочности составных газобетонных изгибаемых перемычек, армированных внешним армированием из композитных материалов. Разрушение армированных перемычек произошло в результате разрушения основного газобетонного элемента при увеличении нагрузки. Степень повышения несущей способности нормальных сечений зависит от вида и положения армирования, средняя несущая способность увеличилась в 7 раз после армирования по типу Б (армирование на изгиб в растянутой грани). Также результаты исследования показали, что тип армирования Д и Е увеличивает

несущую способность составных изгибаемых газобетонных перемычек в 6 раз по сравнению с типом армирования А (без армирования).

3. Получены экспериментальные данные по деформативности газобетонных перемычек, усиленных внешним полосовым армированием. Установлено, что армирование лентами из углеродных волокон уменьшает деформативность газобетонных изгибаемых элементов вследствие увеличения изгибной жесткости при нагрузках до 60 % от разрушающих и вследствие изменения расчетной схемы конструкции при нагрузках свыше 60 % соответственно. Составные газобетонные изгибаемые перемычки, армированные стальными стержнями, имеют хрупкое разрушение по сравнению с усиленными внешним полосовым армированием. С другой стороны, данное исследование показало, что составные газобетонные перемычки, усиленные лентами из углеродных волокон, также могут выдерживать требуемую нагрузку и соответствовать пределу эксплуатационной пригодности, обеспечивая значительную экономию времени и средств.

4. Проведены численные исследования по определению прочностных и деформативных свойств армированных конструкций с применением программного комплекса, проведено сравнение полученных данных с экспериментальными исследованиями, сделаны выводы о сходимости и достоверности результатов.

5. С использованием разработанной программы проведено исследование приведенного сопротивления теплопередаче перемычек из газобетонных блоков различного типа. Установлено, что по отношению к сплошной армированной перемычке у составной перемычки из газобетонных блоков, армированной лентами из углеродных волокон по шву, показатели теплопроводности выше на 11 %; по отношению к составной перемычки из U-образных блоков – на 26 % за счет отсутствия теплопроводных включений в виде арматурного каркаса и тяжелого бетона в теле перемычки.

6. Проведено исследование приведенного сопротивления теплопередаче стеновой конструкции с перемычками различного типа. Установлено, что по отношению к стене со сплошной армированной перемычкой у стены с составной

перемычкой из газобетонных блоков, армированной лентами из углеродных волокон по шву, показатели теплопроводности выше на 8 %; по отношению к стене с составной перемычкой из U-образных блоков – на 11 % за счет отсутствия теплопроводных включений в виде арматурного каркаса и тяжелого бетона в теле перемычки.

7. Проведены численные исследования стеновой конструкции из газобетонных блоков по определению теплозащитных свойств ограждающих конструкций с применением программного комплекса, проведено сравнение полученных данных с теоретическими исследованиями, сделаны выводы о сходимости и достоверности результатов.

8. Произведено ранжирование составных перемычек по степени эффективности их использования в качестве перекрытия оконных и дверных проемов в ограждающих конструкциях зданий по физико-механическим и экономическим критериям. По совокупности факторов установлена последовательность повышения эффективности применения в контексте снижения теплопотерь через ограждающие конструкции при обеспечении требуемой прочности и низкой стоимости: перемычка с одним стальным стержнем → перемычка с одним стеклокомпозитным стержнем → перемычка с двумя стальными стержнями → перемычка с двумя стеклокомпозитными стержнями → армированная сплошная перемычка → составная перемычка из U-образных блоков → перемычка с лентами из углеродных волокон по шву → перемычка с одним стальным стержнем и лентами из углеродных волокон по шву → перемычка с одним стеклокомпозитным стержнем и лентами из углеродных волокон по шву → перемычка с двумя стальными стержнями и лентами из углеродных волокон по шву → перемычка с двумя стеклокомпозитными стержнями и лентами из углеродных волокон по шву. Для дальнейших исследований были приняты перемычка с двумя стеклокомпозитными стержнями и лентами из углеродных волокон по шву и перемычка с двумя стальными стержнями и лентами из углеродных волокон по шву.

4. ОБУЧЕНИЕ РАЗРАБОТАННОЙ МОДЕЛИ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ И АЛГОРИТМА МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

4.1. Обучение модели искусственной нейронной сети

В рамках данного исследования использовался набор обучающих данных (Наборы 1-3), включающий результаты расчетно-экспериментальных исследований, проведенных по эксплуатационным характеристикам многоквартирных домов по ул. Квасова и ул. Попова г. Белгорода, а также многоквартирного дома, расположенного по ул. 60 в г. Аль-Рамади (Ирак).

Этот набор данных был разделен на два основных блока. Первый блок содержал 70 % от общего объема данных, полученных в ходе исследования, для обучения и настройки нейронной сети, чтобы она могла адаптироваться к имеющимся данным и находить в них закономерности. Второй блок составлял 30 % от общего объема данных и использовался для тестирования эффективности работы искусственной нейронной сети. Этот блок позволял оценить точность и достоверность результатов, полученных с использованием нейронной сети.

На рисунке 4.1 представлена структура разработанной искусственной нейронной сети, которая использовалась в данном исследовании для анализа данных и прогнозирования тепловых потерь через ограждающие конструкции рассматриваемого многоквартирного дома, на примере 5 нейронов на внутреннем слое сети.

Для создания моделей искусственных нейронных сетей был осуществлен тщательный процесс обучения, охватывающий не менее 2000 эпох. Этот подход имеет целью обеспечить высокую эффективность обучения, избегая проблем запоминания определенных шаблонов или перетренированности сети.

Подготовленные наборы данных включали как наибольшие, так и наименьшие значения переменных, используемых для построения модели. Это обеспечивает разнообразие в данных обучения, что содействует лучшему адаптивному обучению сети к различным ситуациям.

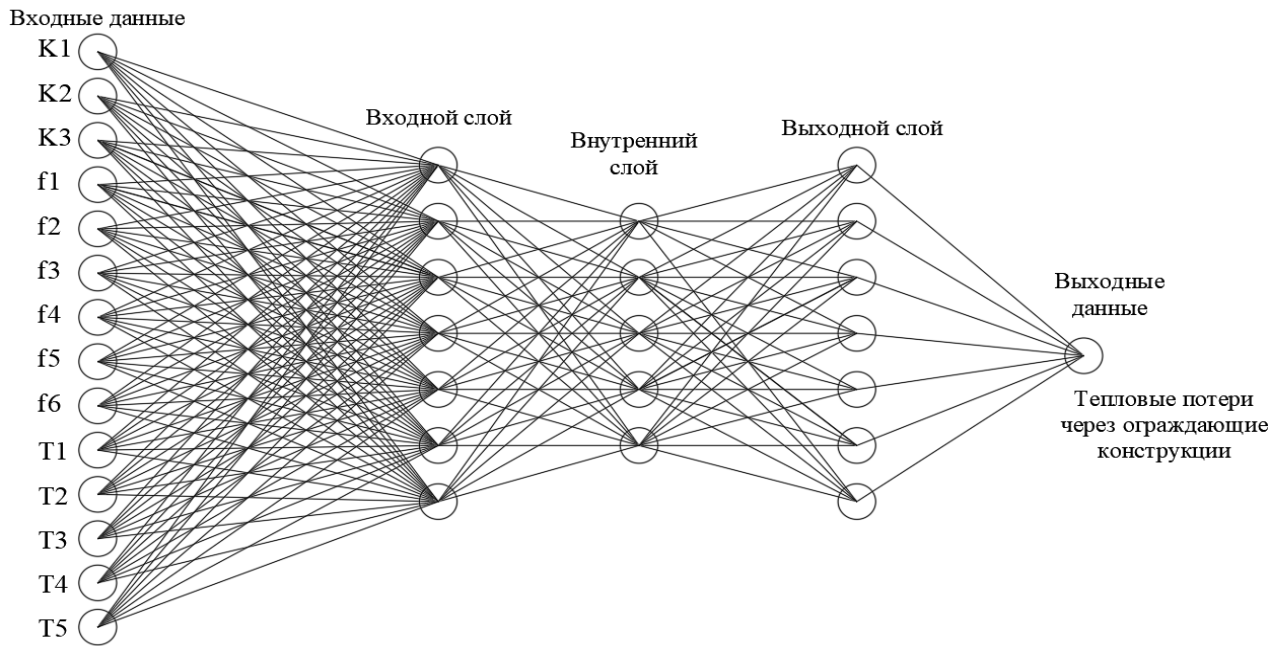


Рисунок 4.1 – Структура разработанной ИНС

В ходе обучения модели настраивались параметры сети с целью минимизации ошибки прогнозирования на тренировочных данных. Такой подход позволял поддерживать целостность процесса обучения, предотвращая как потерю ранее усвоенной информации, так и переобучение сети на тренировочных данных.

Модели ИНС были систематически протестированы с разным числом нейронов на внутреннем слое сети, применяя многослойный персептрон, с целью определения оптимального количества нейронов путем анализа среднеквадратичной ошибки (MSE) и сравнения прогнозируемых значений тестовых данных с фактическими значениями. Было установлено, что наилучшая точность модели ИНС для всех наборов данных достигается при использовании содержания 20 нейронов на внутреннем слое сети, при этом достигается наименьшая ошибка как на тренировочном, так и на тестовом наборе данных в диапазоне от 0,970 до 0,987. Структура оптимальной модели для Набора 1 составляет 1260-20-1; для Набора 2 – 2412-20-1; для Набора 3 – 402-20-1. Результаты обучения ИНС для набора данных представлены в таблицах 4.1-4.3.

Таблица 4.1 – Результаты обучения ИНС для Набора 1

Индекс	Имя	Эффективность		
		тренировки	теста	валидации
1	MLP 1260-30-1	0,988441	0,968951	0,949816
2	MLP 1260-30-1	0,987131	0,969146	0,968239
3	MLP 1260-30-1	0,986776	0,974861	0,958594
4	MLP 1260-30-1	0,985639	0,960862	0,963794
5	MLP 1260-30-1	0,986646	0,965722	0,957243
6	MLP 1260-25-1	0,988111	0,969121	0,949338
7	MLP 1260-25-1	0,987285	0,967919	0,964585
8	MLP 1260-25-1	0,986943	0,975229	0,959217
9	MLP 1260-25-1	0,985316	0,960167	0,962712
10	MLP 1260-25-1	0,982807	0,951169	0,942546
11	MLP 1260-20-1	0,988719	0,969313	0,951702
12	MLP 1260-20-1	0,987418	0,970294	0,970199
13	MLP 1260-20-1	0,980825	0,959198	0,939717
14	MLP 1260-20-1	0,985068	0,957874	0,961345
15	MLP 1260-20-1	0,985851	0,961627	0,952996
16	MLP 1260-15-1	0,988850	0,964694	0,948035
17	MLP 1260-15-1	0,987406	0,970556	0,965207
18	MLP 1260-15-1	0,986770	0,974512	0,951215
19	MLP 1260-15-1	0,986616	0,965480	0,967488
20	MLP 1260-15-1	0,985588	0,961854	0,952852
21	MLP 1260-10-1	0,988725	0,968021	0,952287
22	MLP 1260-10-1	0,987344	0,966662	0,969901
23	MLP 1260-10-1	0,986957	0,976364	0,958161
24	MLP 1260-10-1	0,986434	0,962965	0,968528
25	MLP 1260-10-1	0,986030	0,959952	0,956004
26	MLP 1260-5-1	0,986989	0,945013	0,897236
27	MLP 1260-5-1	0,986742	0,968782	0,966352
28	MLP 1260-5-1	0,986164	0,971307	0,959060
29	MLP 1260-5-1	0,985140	0,965737	0,966321
30	MLP 1260-5-1	0,986877	0,966217	0,964177

Таблица 4.2 – Результаты обучения ИНС для Набора 2

Индекс	Имя	Эффективность		
		тренировки	теста	валидации
1	MLP 2412-30-1	0,984365	0,980584	0,976293
2	MLP 2412-30-1	0,980541	0,978971	0,972348
3	MLP 2412-30-1	0,982407	0,982356	0,981169
4	MLP 2412-30-1	0,978717	0,963261	0,967177
5	MLP 2412-30-1	0,981550	0,979641	0,983413
6	MLP 2412-25-1	0,982460	0,976211	0,971043
7	MLP 2412-25-1	0,984529	0,981830	0,975768
8	MLP 2412-25-1	0,980155	0,976294	0,976441
9	MLP 2412-25-1	0,984786	0,978239	0,976861
10	MLP 2412-25-1	0,982417	0,976429	0,981862
11	MLP 2412-20-1	0,981973	0,978891	0,974674
12	MLP 2412-20-1	0,983281	0,979984	0,972524
13	MLP 2412-20-1	0,982822	0,980198	0,984195
14	MLP 2412-20-1	0,980976	0,973622	0,972566
15	MLP 2412-20-1	0,983327	0,980000	0,984753
16	MLP 2412-15-1	0,984220	0,981114	0,976589
17	MLP 2412-15-1	0,979985	0,973801	0,964003
18	MLP 2412-15-1	0,983424	0,982693	0,984239
19	MLP 2412-15-1	0,982499	0,974008	0,976389
20	MLP 2412-15-1	0,983073	0,979477	0,983769
21	MLP 2412-10-1	0,975384	0,973639	0,962306
22	MLP 2412-10-1	0,984325	0,982831	0,974601
23	MLP 2412-10-1	0,980675	0,980651	0,982749
24	MLP 2412-10-1	0,981529	0,973646	0,973010
25	MLP 2412-10-1	0,980639	0,977631	0,981886
26	MLP 2412-5-1	0,980489	0,983034	0,975911
27	MLP 2412-5-1	0,942938	0,942437	0,928280
28	MLP 2412-5-1	0,980529	0,982852	0,979539
29	MLP 2412-5-1	0,983180	0,978487	0,979273
30	MLP 2412-5-1	0,948987	0,937992	0,946613

Таблица 4.3 – Результаты обучения ИНС для Набора 3

Индекс	Имя	Эффективность		
		тренировки	теста	валидации
1	MLP 402-30-1	0,96028	0,9868	0,96743
2	MLP 402-30-1	0,96807	0,9759	0,9796
3	MLP 402-30-1	0,98072	0,97335	0,97393
4	MLP 402-30-1	0,97693	0,98344	0,98493
5	MLP 402-30-1	0,96681	0,98599	0,98139
6	MLP 402-25-1	0,96211	0,98622	0,96025
7	MLP 402-25-1	0,98827	0,97195	0,96374
8	MLP 402-25-1	0,96185	0,96425	0,98565
9	MLP 402-25-1	0,98052	0,9712	0,96685
10	MLP 402-25-1	0,9705	0,98641	0,97191
11	MLP 402-20-1	0,98665	0,97798	0,98604
12	MLP 402-20-1	0,96829	0,96392	0,96806
13	MLP 402-20-1	0,96548	0,98513	0,97464
14	MLP 402-20-1	0,98018	0,96315	0,96353
15	MLP 402-20-1	0,98242	0,98134	0,96582
16	MLP 402-15-1	0,96513	0,9772	0,97214
17	MLP 402-15-1	0,98559	0,96288	0,98318
18	MLP 402-15-1	0,97075	0,98888	0,97478
19	MLP 402-15-1	0,98019	0,96413	0,97545
20	MLP 402-15-1	0,97891	0,97342	0,97548
21	MLP 402-10-1	0,9826	0,97591	0,97759
22	MLP 402-10-1	0,97051	0,96206	0,97488
23	MLP 402-10-1	0,96996	0,96828	0,96492
24	MLP 402-10-1	0,98627	0,97359	0,96257
25	MLP 402-10-1	0,96366	0,98613	0,98216
26	MLP 402-5-1	0,96182	0,96645	0,9804
27	MLP 402-5-1	0,98063	0,98448	0,97866
28	MLP 402-5-1	0,97625	0,97903	0,97066
29	MLP 402-5-1	0,96841	0,97443	0,96355
30	MLP 402-5-1	0,96248	0,98425	0,97922

Выбор правильных данных для обучения нейронных сетей подтверждается их высокой сходимостью с фактическими значениями на графиках прогнозирования временных рядов, представленных на рисунках 4.2-4.4. Фактические значения временных рядов обозначены синим цветом, а прогнозируемые значения, полученные от нейронной сети, обозначены красным цветом.

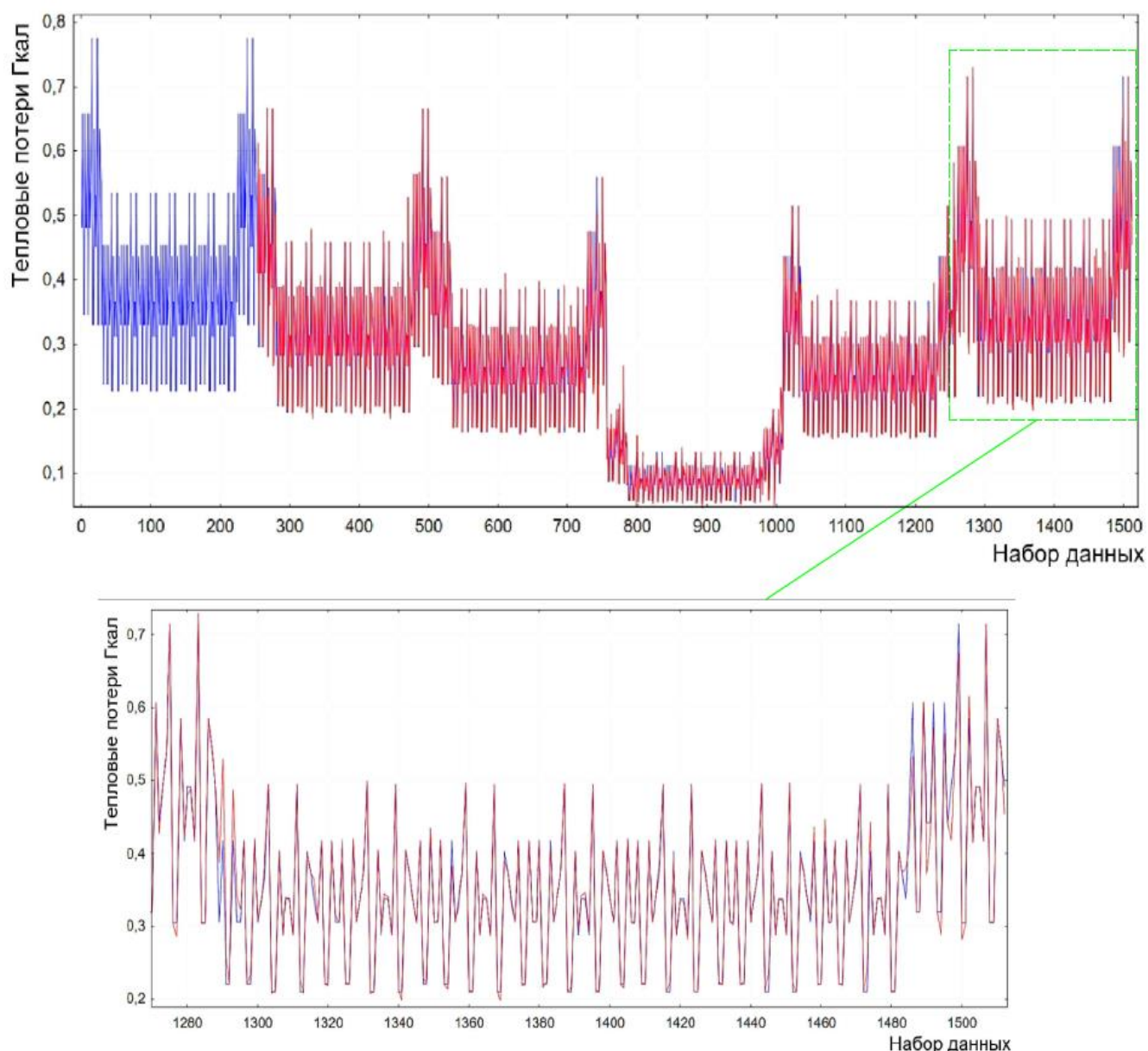


Рисунок 4.2 – График прогнозов временных рядов для сети с выборкой тренировки, теста и валидации на основе Набора 1: — фактические значения;
— прогнозные значения

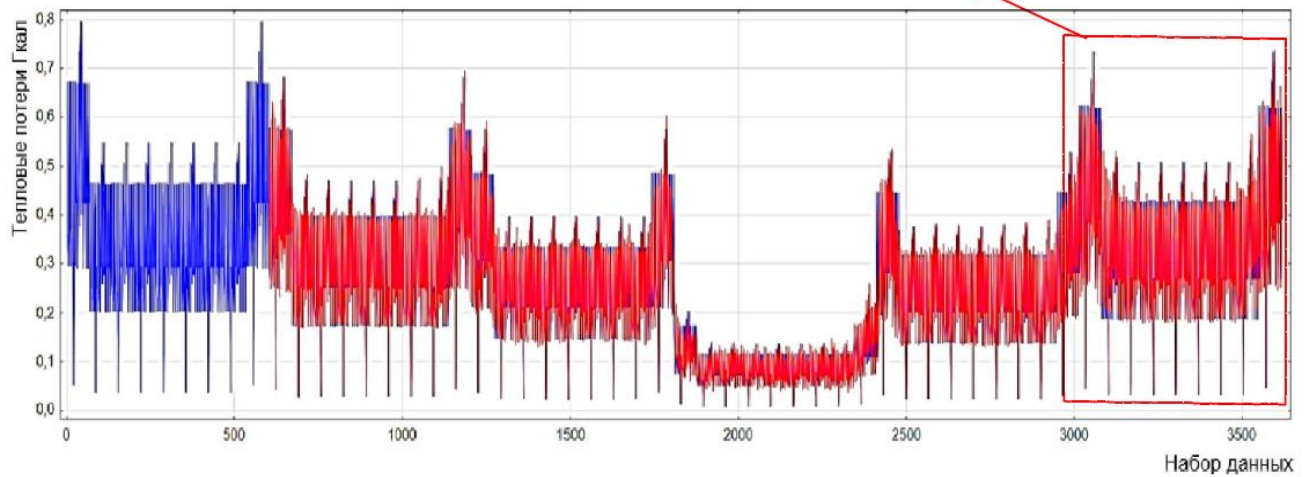
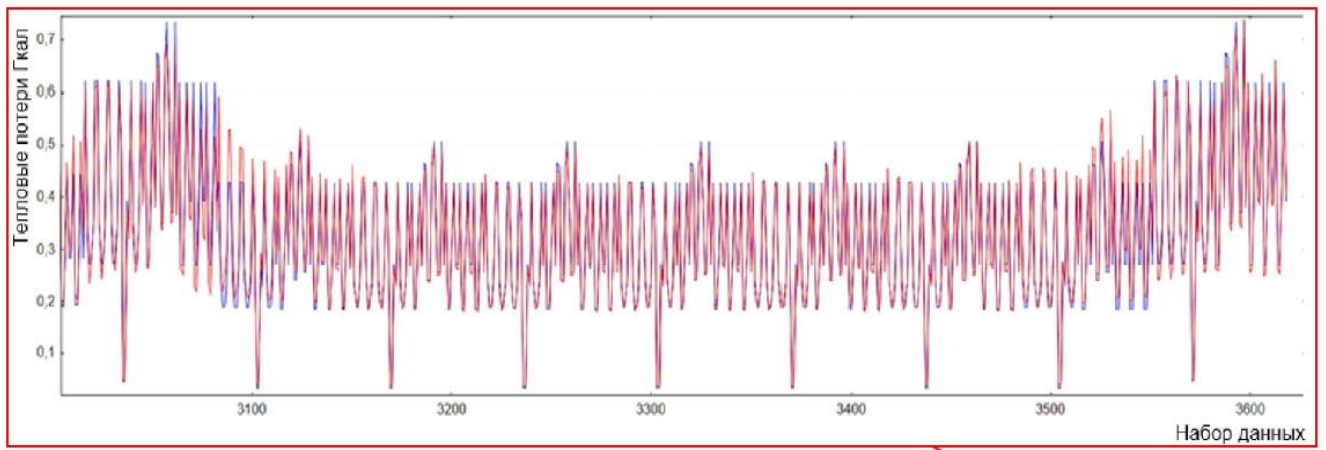


Рисунок 4.3 – График прогнозов временных рядов для сети с выборкой тренировки, теста и валидации на основе Набора 2: — фактические значения;
— прогнозные значения

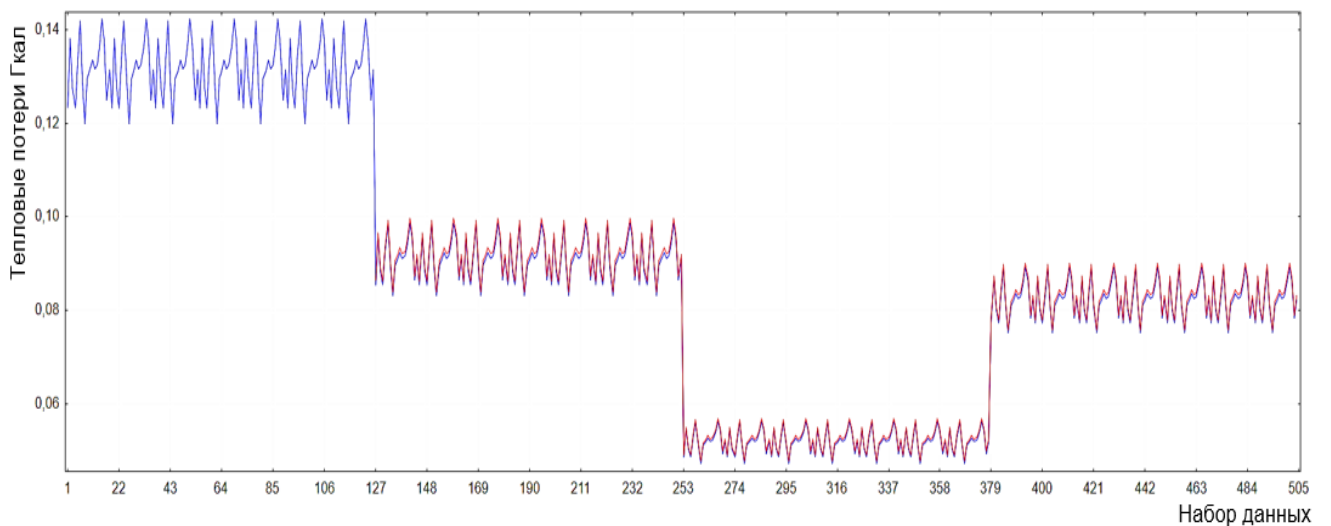


Рисунок 4.4 – График прогнозов временных рядов для сети с выборкой тренировки, теста и валидации на основе Набора 3: — фактические значения;
— прогнозные значения

Высокая сходимость между фактическими и прогнозируемыми значениями на графике указывает на то, что нейронная сеть успешно определяет основные закономерности и зависимости в данных, обучаясь на выбранных обучающих данных. Это свидетельствует о том, что данные, использованные для обучения сети, корректно отражают характеристики исследуемого процесса или явления, что в свою очередь подтверждает правильность выбора данных для обучения нейронной сети.

На рисунках 4.5-4.7 представлены результаты обучения нейронной сети, которые сравниваются с фактическими значениями из набора данных. Из представленных графиков видно, что результаты прогнозирования потерь теплоты через ограждающие конструкции, полученные с использованием ИНС, достаточно близки к значениям, определенным в наборе данных. Фактические значения из набора данных и прогнозируемые значения от нейронной сети сравниваются на каждом из этих графиков.

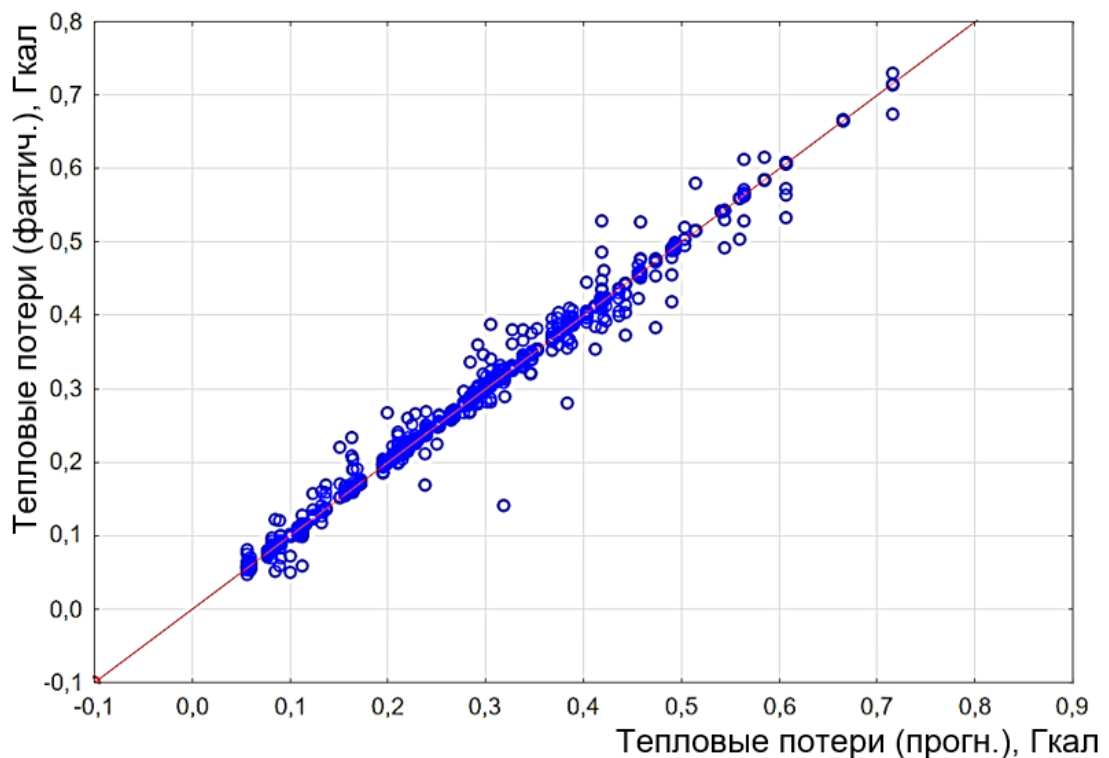


Рисунок 4.5 – Результаты обучения ИНС для данных Набора 1

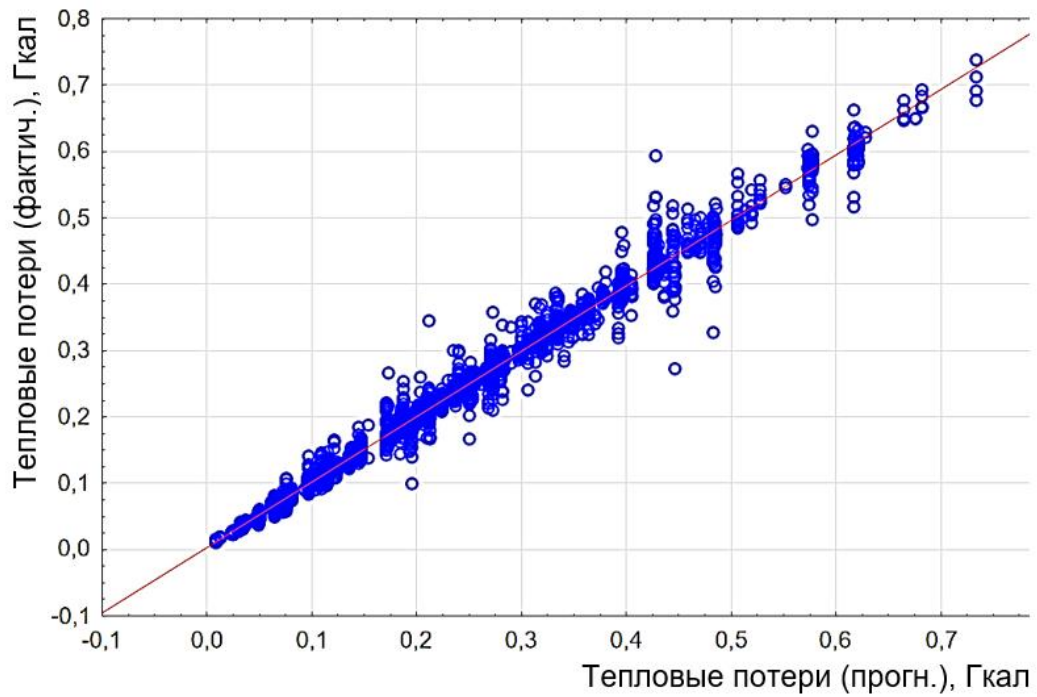


Рисунок 4.6 – Результаты обучения ИНС для данных Набора 2

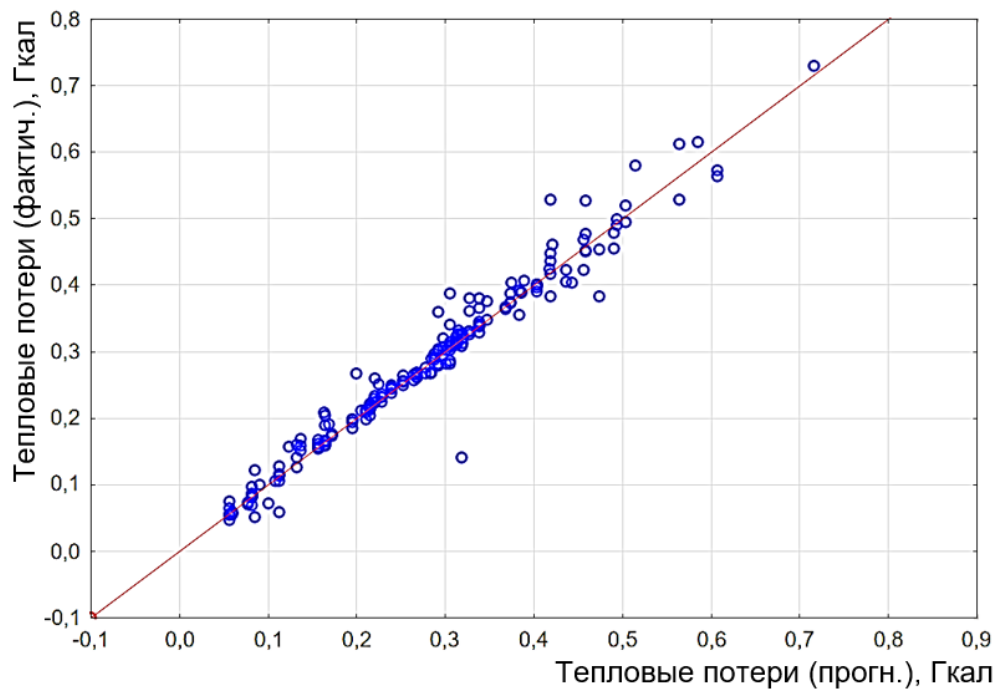


Рисунок 4.7 – Результаты обучения ИНС для данных Набора 3

Высокая плотность точек на прямой, отображающей соответствие между фактическими и прогнозными значениями, указывает на то, что фактическая функция хорошо соответствует прогнозной функции. Это подтверждает высокую точность и эффективность модели нейронной сети в прогнозировании потерь теплоты через ограждающие конструкции.

Гистограмма остатков, представленная на рисунках 4.8-4.10, демонстрирует, что остатки (разница между фактическими и прогнозируемыми значениями) соответствуют нормальному закону распределения Гаусса-Лапласа. Это означает, что остатки имеют симметричное распределение с пиком в центре, что характерно для нормального распределения, и указывает на то, что модель ИНС достаточно точно описывает зависимости в данных, и остатки распределены равномерно вокруг нуля, что свидетельствует об отсутствии систематической ошибки модели. Это подтверждает высокую точность и эффективность модели нейронной сети в прогнозировании потерь теплоты через ограждающие конструкции.

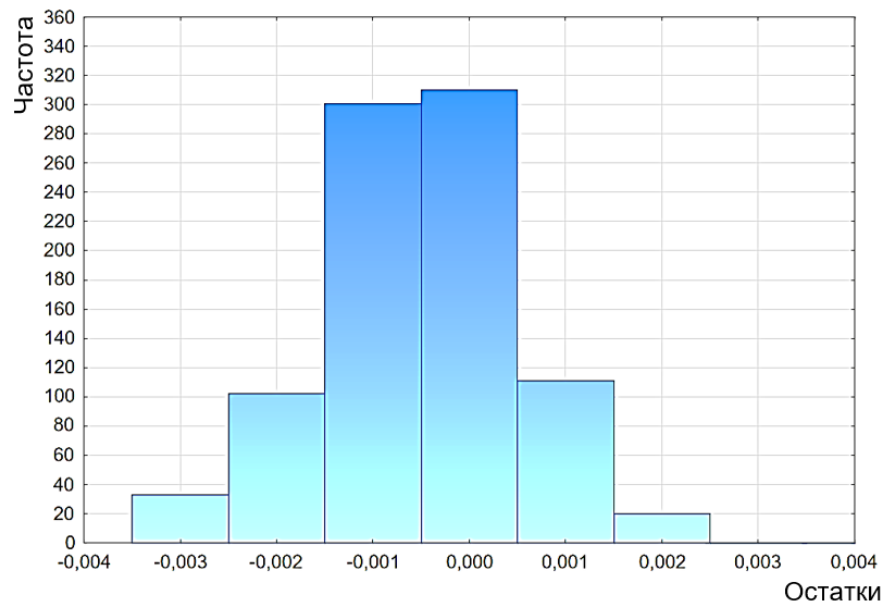


Рисунок 4.8 – Гистограмма остатков временного ряда для данных Набора 1

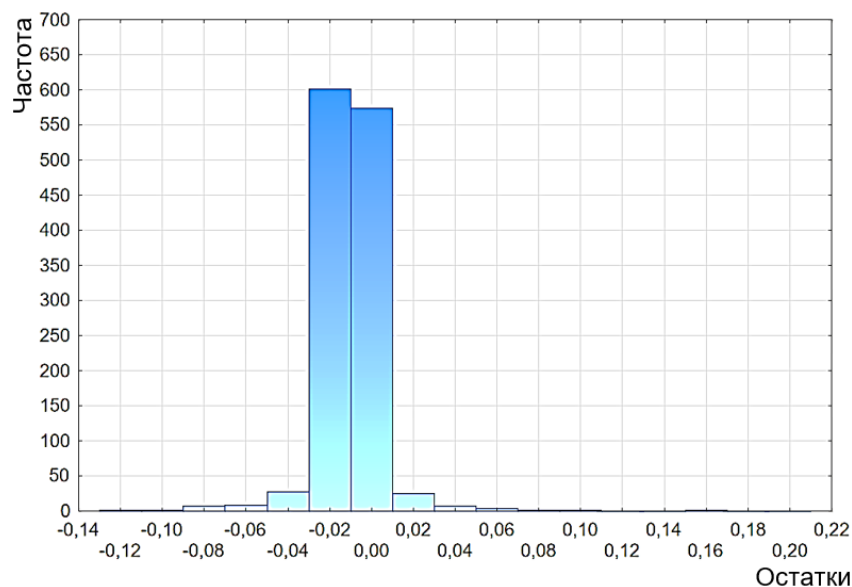


Рисунок 4.9 – Гистограмма остатков временного ряда для данных Набора 2

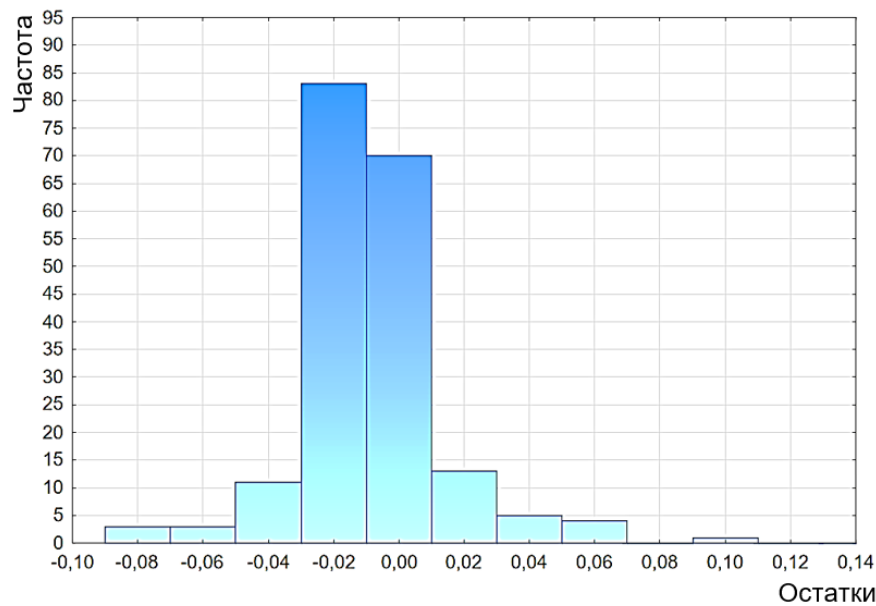


Рисунок 4.10 – Гистограмма остатков временного ряда для данных Набора 3

На диаграммах регрессии (рисунок 4.4), представленных для всех этапов, включая этапы обучения, валидации и тестирования, видно, что значения коэффициентов корреляции (R) превышают 95% для всех этапов. Это означает, что существует сильная корреляция между фактическими и прогнозируемыми значениями на всех этапах эксперимента.

Таким образом, результаты прогнозирования, полученные с использованием разработанных в данном исследовании моделей ИНС, можно считать адекватными. Это свидетельствует о том, что модели успешно описывают зависимости в данных и способны делать точные прогнозы. Высокие значения коэффициентов корреляции подтверждают, что прогнозы, сделанные с использованием этих моделей, достаточно точны и надежны.

Кроме того, архитектура и параметры этих моделей полностью обоснованы с точки зрения характера решаемых задач. Это означает, что выбор числа слоев, нейронов и других параметров нейронной сети был осуществлен с учетом особенностей данных и требований задачи, что дополнительно подтверждает адекватность и обоснованность использованных моделей.

4.2. Обучение алгоритма машинного обучения

В качестве машинного обучения использовался алгоритм машинного обучения на основе библиотеки scikit-learn, описанный в п. 2.2.3.

Scikit-learn предоставляет десятки встроенных алгоритмов и моделей машинного обучения, называемых оценщиками (estimators). Оценщик в библиотеке scikit-learn (sklearn) – это класс, который реализует методы обучения модели. Обучение производилось с использованием оценщика «RandomForestClassifier» (рисунок 4.11).

```
>>> from sklearn.ensemble import RandomForestClassifier
>>> clf = RandomForestClassifier(random_state=0)
>>> X = [[...],
...      [...]]
>>> y = [0, 1] # класс для каждой записи
>>> clf.fit(X, y) # обучение
RandomForestClassifier(random_state=0)
```

Рисунок 4.11 – Оценщик «RandomForestClassifier»

Сначала импортируются RandomForestClassifier из библиотеки sklearn.ensemble. Этот класс используется для создания модели случайного леса, который является одним из методов машинного обучения.

Перед построением каждого дерева в случайном лесу из общего набора данных случайным образом выбирается подвыборка данных (с повторениями) размером равным или меньшим исходному набору данных. На основе полученных подвыборок данных строятся отдельные деревья решений. Каждое дерево строится путем разбиения данных на более чистые подгруппы в соответствии с набором правил, которые максимизируют информационный прирост.

Далее создается экземпляр этого класса, присваивая его переменной clf. Используется random_state=0, чтобы убедиться, что результаты будут воспроизводимыми, т.е. каждый раз, когда производится запуск кода, получаются одинаковые результаты.

После этого обеспечиваются данные для обучения модели. X представляет собой матрицу признаков, где каждая строка – это одна запись, а каждый столбец

– это признак u представляет собой вектор целевых значений, где каждый элемент соответствует классу для соответствующей записи из X .

Когда все деревья построены, каждое дерево в случайном лесу делает прогноз на основе своих правил. Затем прогнозы всех деревьев комбинируются путем голосования (для классификации) или усреднения (для регрессии), чтобы получить окончательный прогноз случайного леса. Модель обучается, используя метод `.fit()`, передавая ему X и y .

Далее для автоматического поиска наилучших комбинаций параметров (через перекрестную проверку). Проводим поиск наилучших параметров среди множества различных параметров случайного леса `RandomizedSearchCV` (рисунок 4.12). Когда поиск завершен, `RandomizedSearchCV` ведет себя так, как если бы `RandomForestRegressor` был подобран с лучшим набором параметров.

Данные разделяются на обучающий и тестовый наборы с использованием функции `train_test_split`. Обучающий набор составляет 75% данных, а тестовый – 25%.

```
from sklearn.ensemble import RandomForestClassifier
from sklearn.model_selection import RandomizedSearchCV, train_test_split
from scipy.stats import randint

X, y = [...], [...]
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y, random_state=0)

# Задание набора параметров для случайного поиска гиперпараметров
param_distributions = {'n_estimators': randint(1, 5),
                       'max_depth': randint(5, 10)}

# Создание и обучение объекта RandomizedSearchCV
search = RandomizedSearchCV(estimator=RandomForestClassifier(random_state=0),
                           n_iter=5,
                           param_distributions=param_distributions,
                           random_state=0)
search.fit(X_train, y_train)
param_distributions={'max_depth': ...,
                    'n_estimators': ...},
random_state=0)
>>> search.best_params_
{'max_depth': 9, 'n_estimators': 4}

>>> # наилучшие параметры оказались - max_depth=9 and n_estimators=4
>>> search.score(X_test, y_test)
0.88
```

Рисунок 4.12 – Автоматический подбор параметров

Задается набор параметров для случайного поиска гиперпараметров. В данном случае мы ищем оптимальное количество деревьев (`n_estimators`) и максимальную глубину деревьев (`max_depth`). Для каждого параметра указан диапазон значений.

Создается объект `RandomizedSearchCV` с параметрами: `estimator`: модель, которую мы хотим настроить, в данном случае `RandomForestClassifier`; `n_iter`: количество итераций случайного поиска; `param_distributions`: набор параметров и их распределений для случайного поиска; `random_state`: для воспроизводимости результатов.

Обучается модель, вызывая метод `.fit()` на обучающих данных.

Выводятся лучшие найденные параметры с помощью `search.best_params_`.

Для предварительной обработки данных перед их передачей в модель машинного обучения использовался препроцессор `StandardScaler`.

Для оценки модели линейной регрессии выполнена пятикратная процедура перекрестной проверки с помощью метода `cross_validate` (рисунок 4.13).

```
>>> from sklearn.datasets import make_regression
>>> from sklearn.linear_model import LinearRegression
>>> from sklearn.model_selection import cross_validate
...
>>> X, y = make_regression(n_samples=2000, random_state=0)
>>> lr = LinearRegression()
...
>>> result = cross_validate(lr, X, y)
>>> result['test_score'] # оценка r-квадрат
array([0.88., 0.83., 0.93., 0.91., 0.93.] )
```

Рисунок 4.13 – Оценка модели

Полученный результат перекрестной проверки содержит различные метрики оценки качества модели. `test_score` представляет собой оценку качества модели на тестовых данных для каждой части данных (фолда) в виде массива. В данном случае, так как все значения находятся в диапазоне от 0,83 до 0,93, это означает, что модель предсказывает целевую переменную достаточно точно на всех фолдах.

На рисунках 4.14-4.16 представлены графики регрессии модели, которые отображают соотношение между фактическими значениями и прогнозными

значениями, полученными с использованием данной модели. Высокая плотность точек на прямой диаграммы рассеяния указывает на то, что фактическая функция хорошо соответствует прогнозной функции, что подтверждает высокую точность модели.

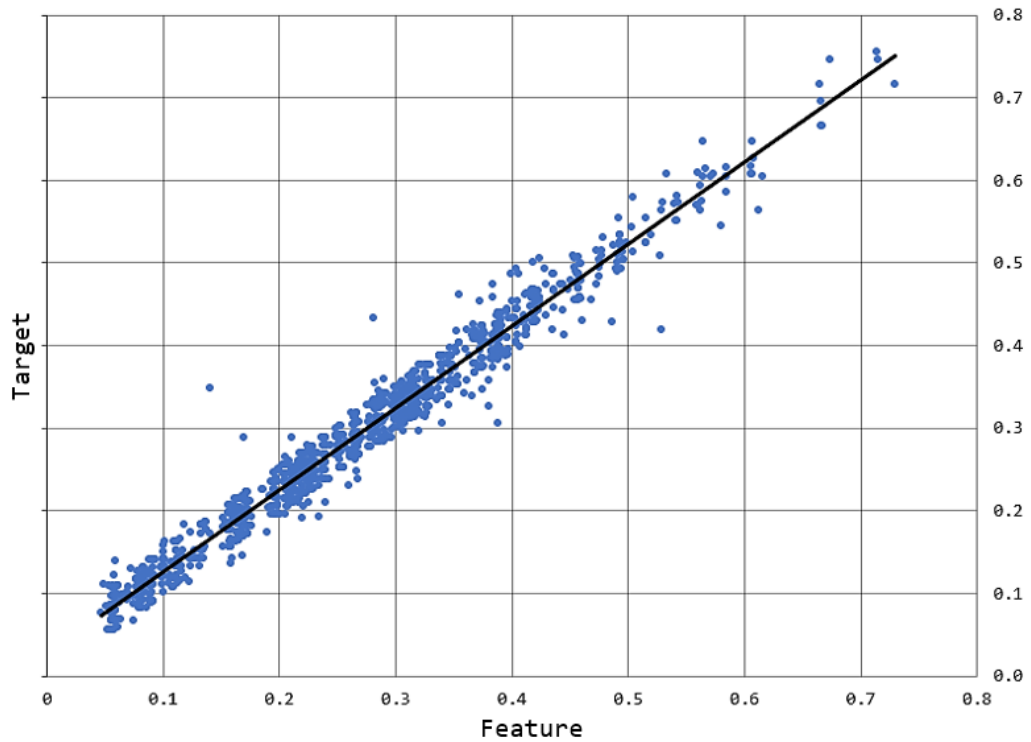


Рисунок 4.14 – График регрессии модели для данных Набора 1

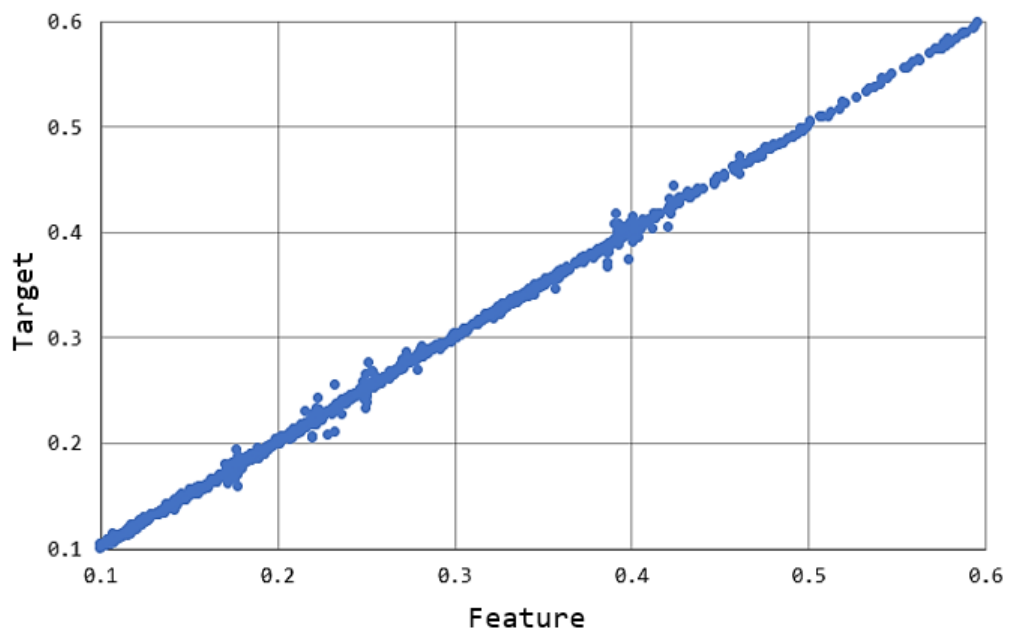


Рисунок 4.15 – График регрессии модели для данных Набора 2

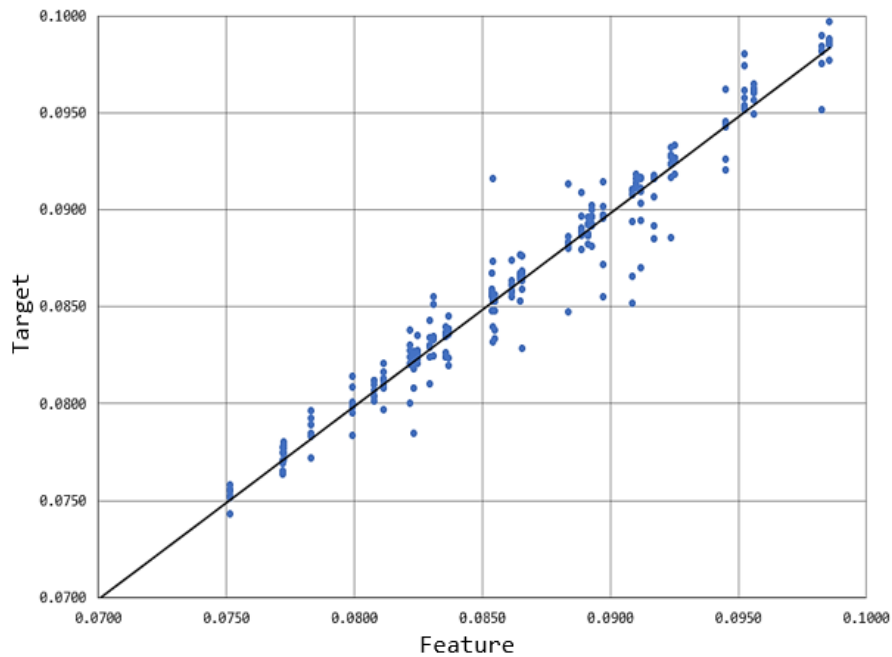


Рисунок 4.16 – График регрессии модели для данных Набора 3

На рисунках 4.17-4.19 представлены гистограммы остатков временного ряда, которые демонстрируют распределение остатков (разницы между фактическими и прогнозными значениями) в соответствии с нормальным законом распределения Гаусса-Лапласа. Пик в центре и относительно симметричные боковые стороны гистограммы указывают на то, что остатки распределены равномерно вокруг нуля, что характерно для нормального распределения, и отсутствует систематическая ошибка модели.

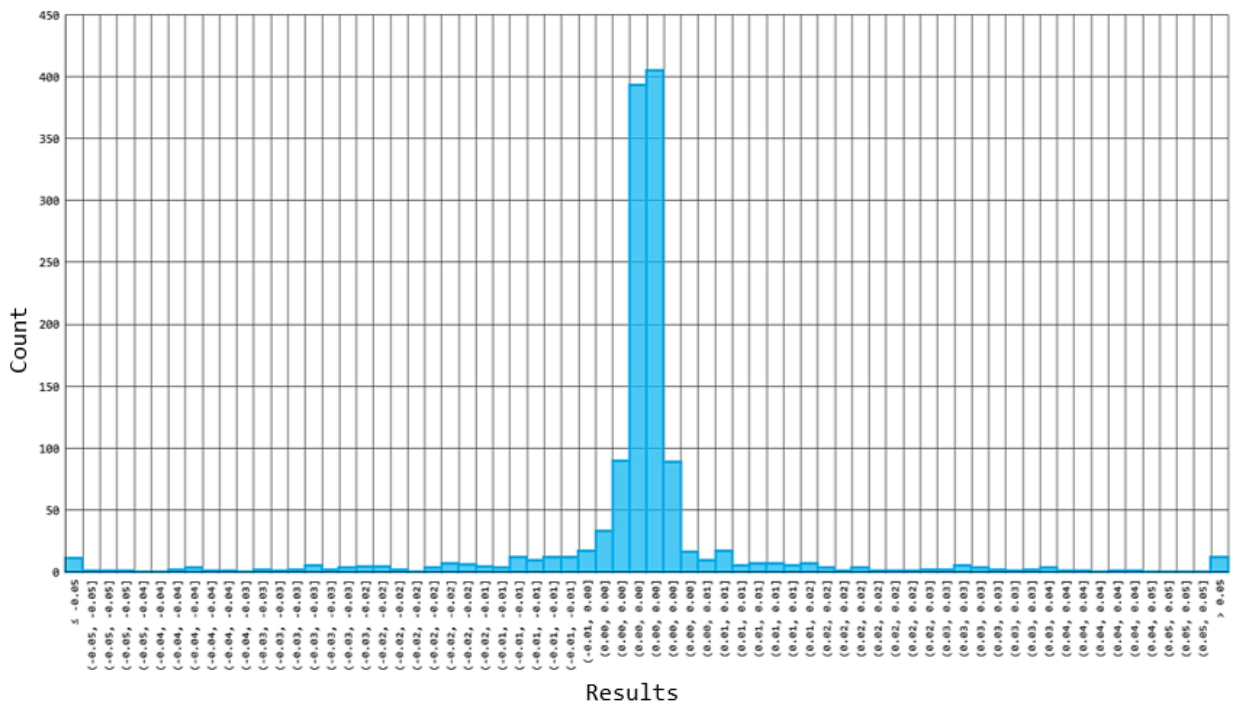


Рисунок 4.17 – Гистограмма остатков временного ряда для данных Набора 1

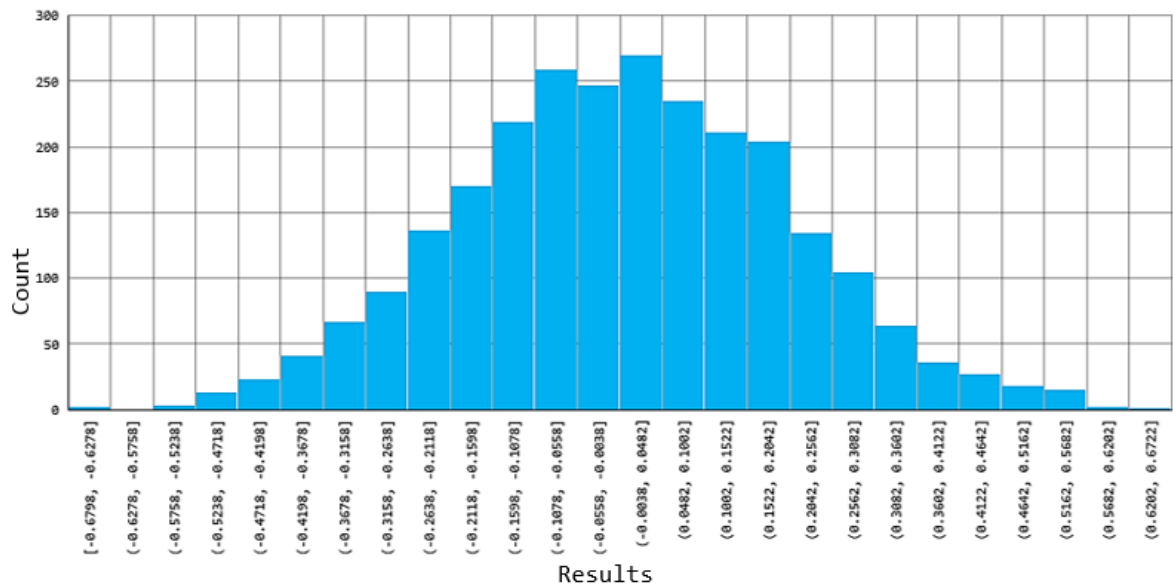


Рисунок 4.18 – Гистограмма остатков временного ряда для данных Набора 2

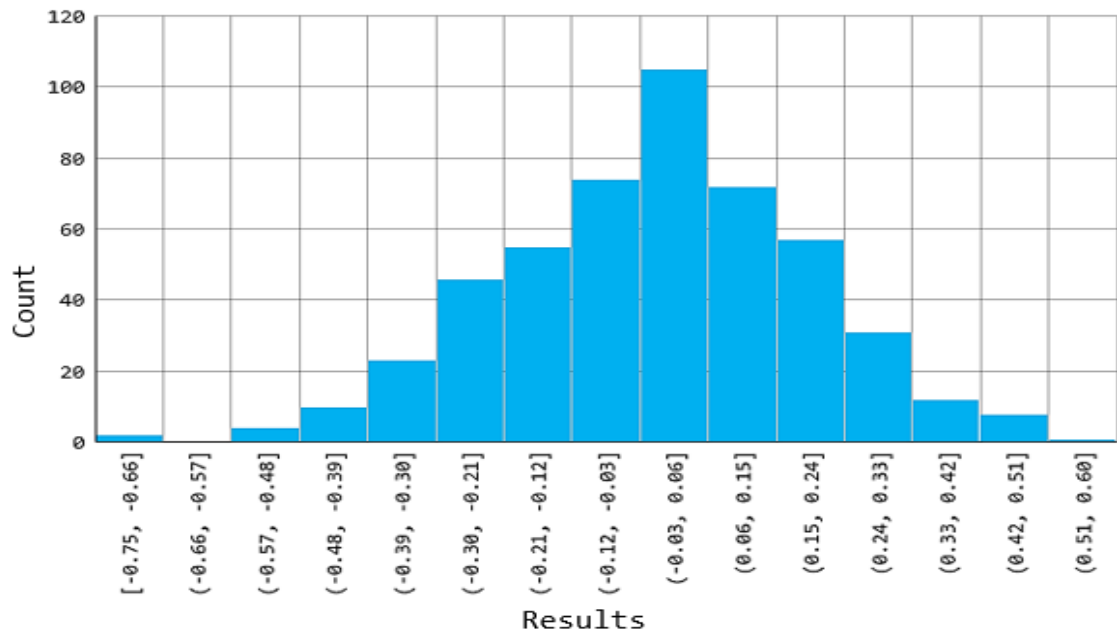


Рисунок 4.19 – Гистограмма остатков временного ряда для данных Набора 3

На рисунках 4.20-4.22 представлены графики результатов предсказаний и исходных данных на основе обученной и оцененной модели. На этих графиках можно увидеть, насколько близки прогнозные значения (черная линия) к фактическим данным (синяя линия), что также подтверждает адекватность и точность модели.

Результаты кросс-валидации также подтверждают адекватность модели, показывая, что прогнозируемые значения достаточно точны на всех фолдах данных.

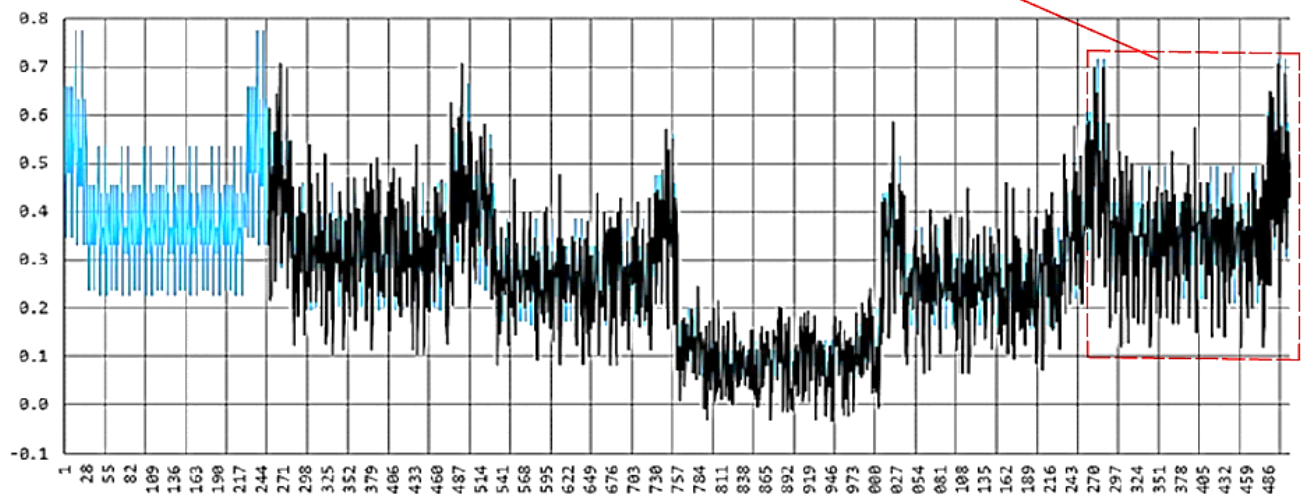
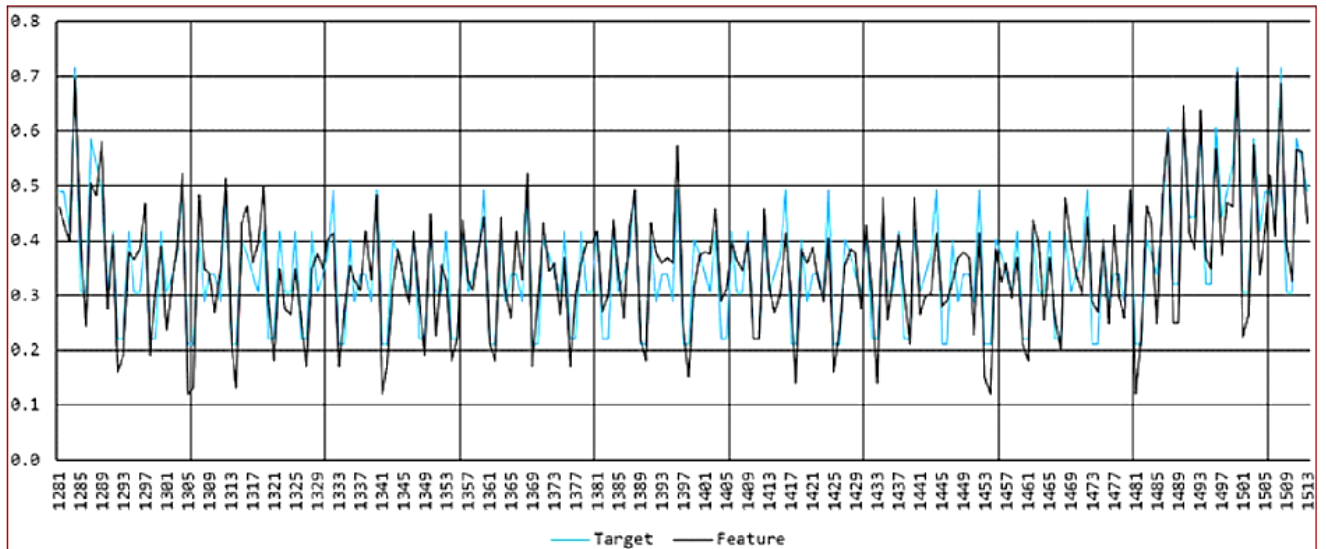


Рисунок 4.20 – График результатов предсказаний и исходных данных на основе обученной и оцененной модели для данных Набора 1: — — фактические значения; — — прогнозные значения

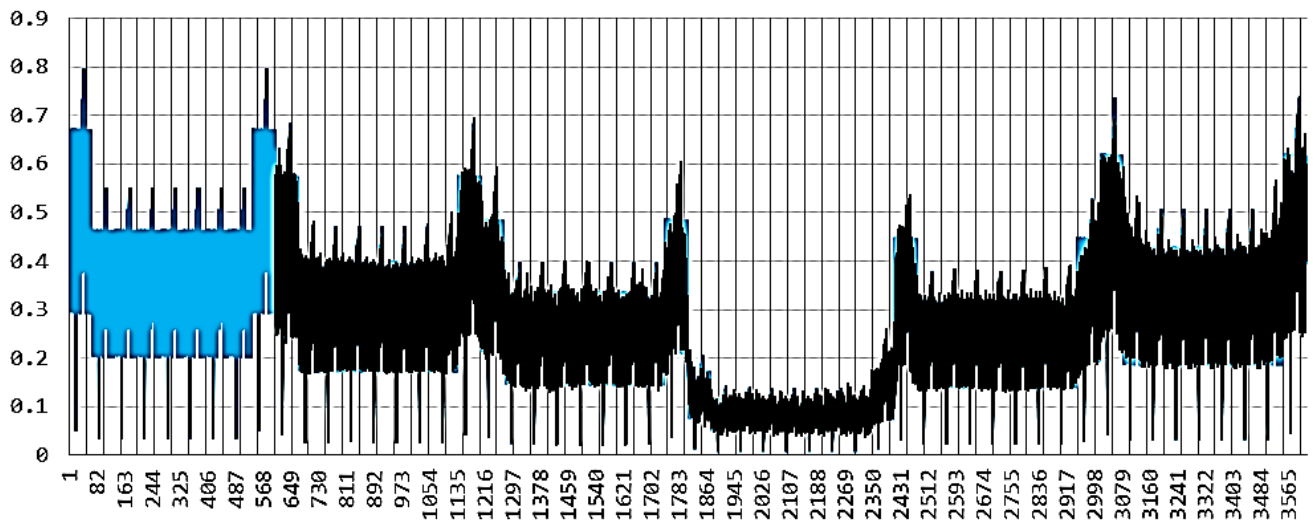


Рисунок 4.21 – График результатов предсказаний и исходных данных на основе обученной и оцененной модели для данных Набора 2: — — фактические значения; — — прогнозные значения

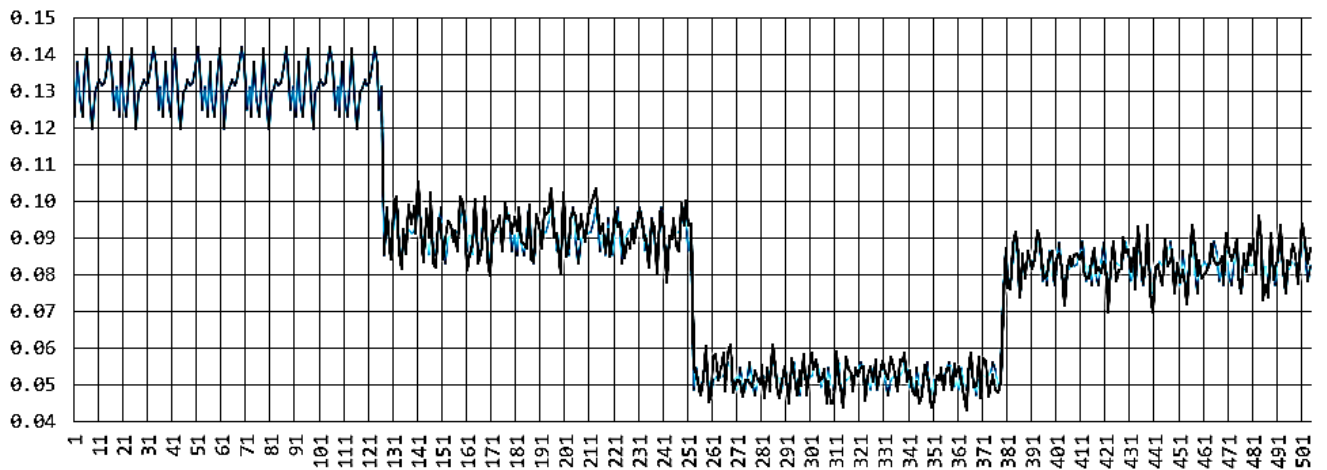


Рисунок 4.22 – График результатов предсказаний и исходных данных на основе обученной и оцененной модели для данных Набора 3: — — фактические значения; — — прогнозные значения

Исходя из этих выводов, можно утверждать, что разработанная модель обладает высокой точностью и эффективностью в прогнозировании целевой переменной. Это позволяет использовать данную модель для решения практических задач и принятия решений на основе прогнозных данных.

4.3. Анализ полученных моделей

Проведен детальный анализ результатов экспериментов и тестирований ИНС и модели машинного обучения на наборе данных. Цель этого анализа – оценить производительность различных моделей, а также сделать выводы о том, какая модель является наиболее эффективной для решения задачи прогнозирования потерь теплоты через ограждающие конструкции.

В рамках данного исследования были рассмотрены две основные модели: искусственная нейронная сеть (ИНС) и модель машинного обучения. Для каждой модели были проанализированы результаты прогнозирования на основе фактических данных.

График прогноза модели машинного обучения и ИНС для Набора 1 (данные на декабрь 2023 г.) представлен на рисунке 4.23.

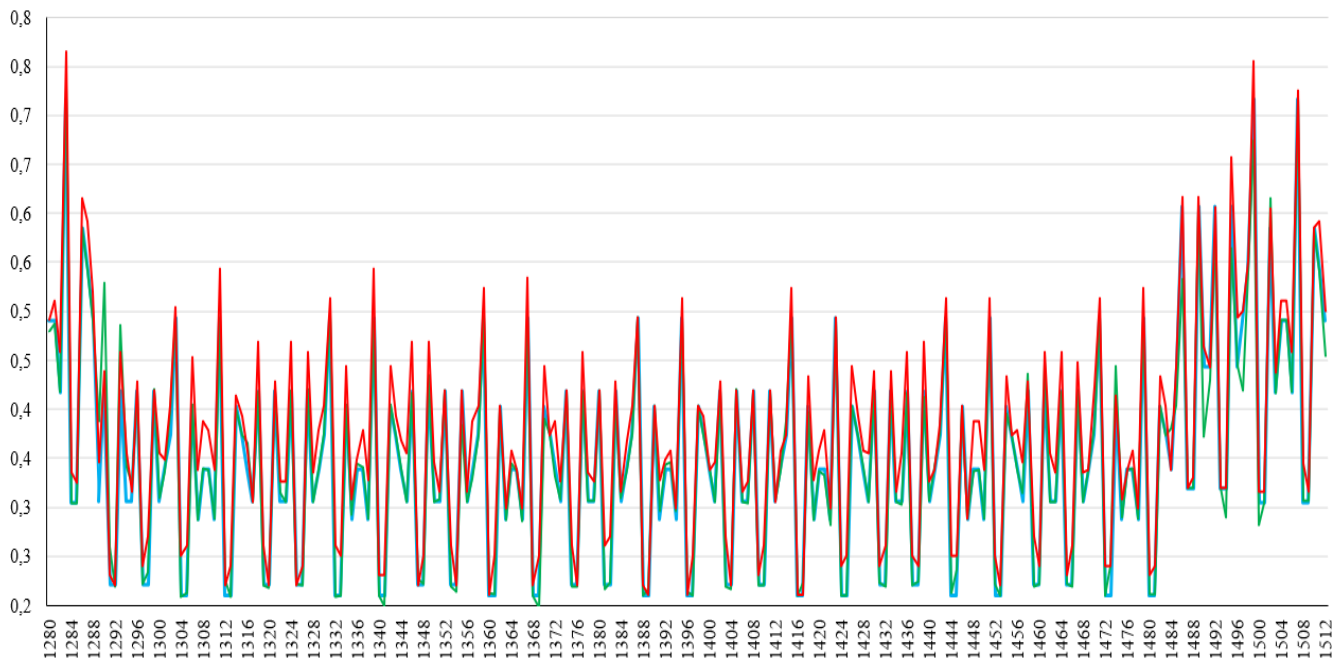


Рисунок 4.23 – График прогноза модели машинного обучения и ИНС для набора данных:
 — расчетные значения; — прогноз ИНС; — прогноз машинного обучения

На рисунке 4.23 видно, что прогнозы ИНС и модели машинного обучения в целом следуют тренду фактических значений. Однако следует обратить внимание на большее отклонение значений, полученных моделью машинного обучения, от фактических значений.

Для разработанных моделей определены следующие меры отклонений:

– MAE (Mean Absolute Error) – это средняя абсолютная ошибка. Это мера разницы между фактическими и прогнозными значениями в модели. Для каждого прогноза рассчитывается абсолютное значение разности между фактическим и прогнозным значением, а затем берется среднее арифметическое всех этих абсолютных разностей. MAE показывает среднее абсолютное отклонение прогнозов от фактических значений;

– MAPE (Mean Absolute Percentage Error) – это средняя абсолютная процентная ошибка. Это мера процентной разницы между фактическими и прогнозными значениями в модели. Для каждого прогноза рассчитывается абсолютное значение процентной разницы между фактическим и прогнозным значением, а затем берется среднее арифметическое всех этих абсолютных

процентных разностей. MAPE показывает среднюю абсолютную процентную ошибку прогнозов от фактических значений;

– квадратичное отклонение (Square Deviation) – это мера разброса данных относительно их среднего значения. Оно показывает, насколько данные распределены вокруг среднего значения. Большое квадратичное отклонение означает, что данные сильно разбросаны, а маленькое - что данные сосредоточены вокруг среднего значения;

– стандартное отклонение (Standard deviation) – это важная мера, используемая в статистике для измерения степени изменчивости или разброса данных в выборке. Оно позволяет оценить, насколько значения в выборке отклоняются от их среднего значения.

Для оценки эффективности моделей ИНС и машинного обучения проведено сравнение мер отклонений, представленное на рисунке 4.24.

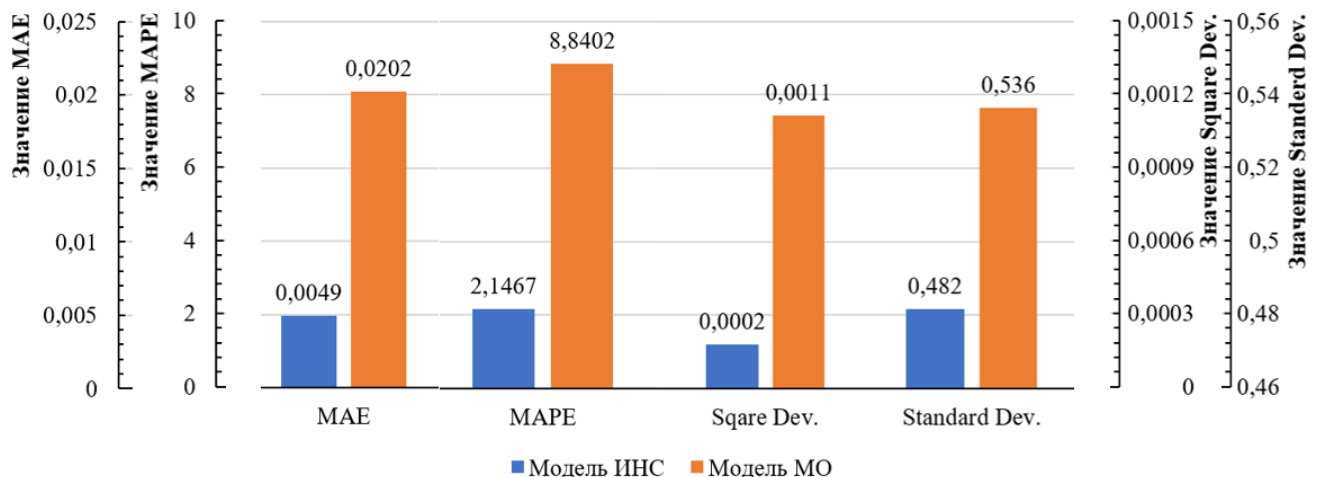


Рисунок 4.24 – Показатели отклонений модели

Модель ИНС демонстрирует более точные прогнозы, чем модель машинного обучения, по всем рассмотренным метрикам (MAE, MAPE, стандартное и квадратичное отклонение).

Анализ квадратичной ошибки также подтверждает превосходство ИНС, поскольку она имеет более низкое значение квадратичной ошибки, что означает более точное прогнозирование в сравнении с моделью машинного обучения.

Таким образом, на основе проведенного анализа можно утверждать, что модель ИНС эффективнее модели машинного обучения для данного набора данных.

4.4. Оптимизация точности прогноза

Произведена оптимизации точности прогнозирования модели на основе искусственных нейронных сетей. В процессе исследования производится анализ чувствительности различных входных параметров на точность прогнозирования, их ранжирование по степени влияния и анализ взаимосвязи между ними.

Сбор данных о чувствительности переменных набора данных на конечный прогноз тепловых потерь через ограждающие конструкции производился как при обучении модели ИНС, так и при ее применении. Диаграммы чувствительности переменных с выборкой тренировки, теста, валидации и с совокупной выборкой представлены на рисунках 4.25-4.28.

Из данных, представленных на рисунках 4.25-4.28, можно сделать о том, что наиболее чувствительными переменными для прогноза тепловых потерь через ограждающие конструкции являются температура наружного воздуха (K1), световой коэффициент (T2) и приведенное сопротивление теплопередаче стены без учета остекления (f2).

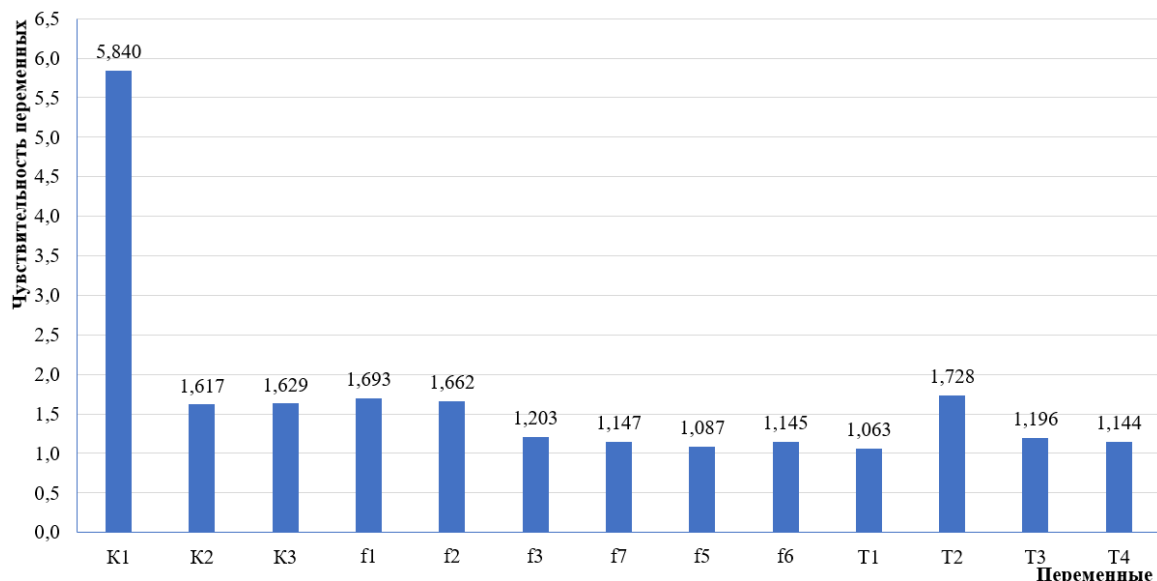


Рисунок 4.25 – Диаграммы чувствительности переменных: с выборкой тренировки

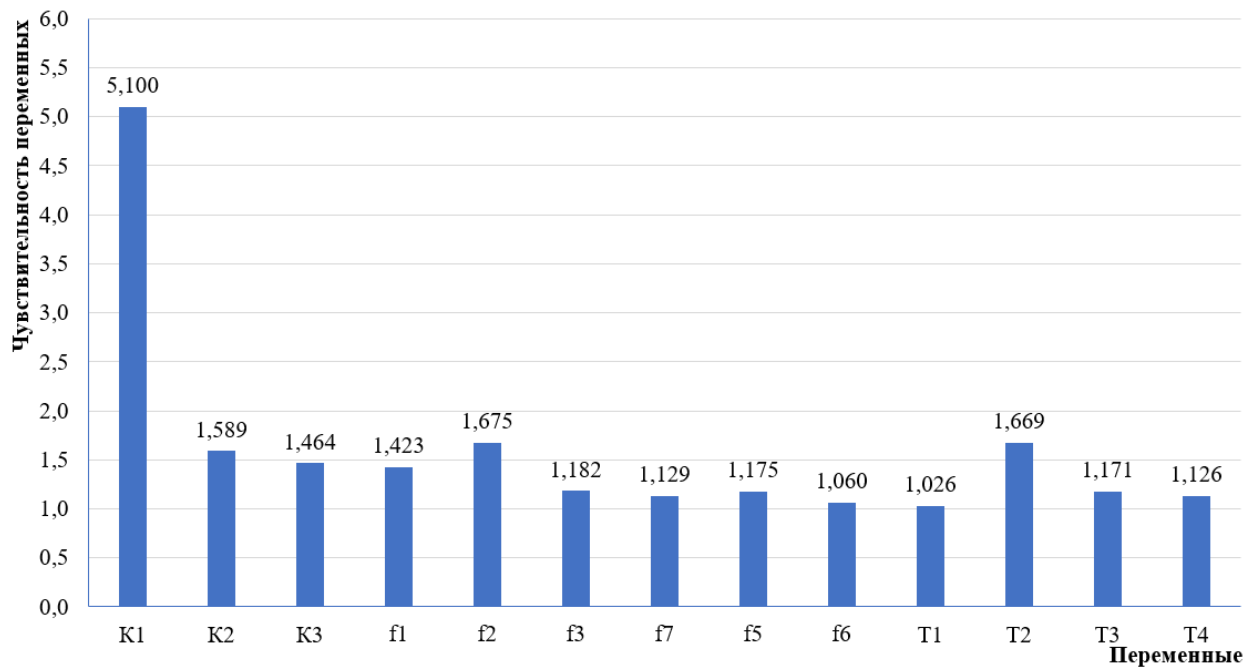


Рисунок 4.26 – Диаграммы чувствительности переменных с выборкой теста

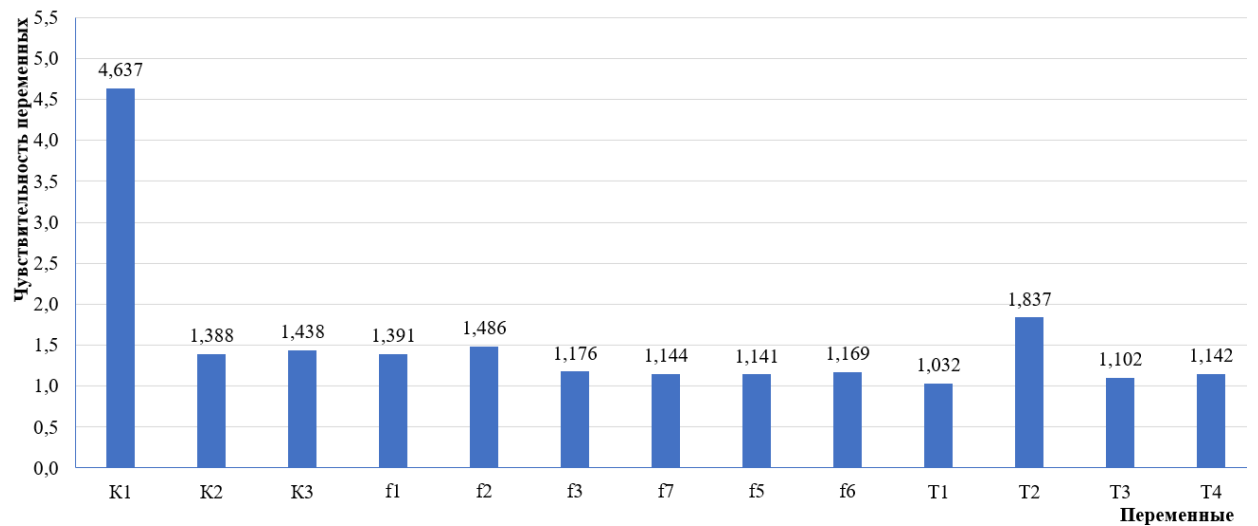


Рисунок 4.27 – Диаграммы чувствительности переменных с выборкой валидации

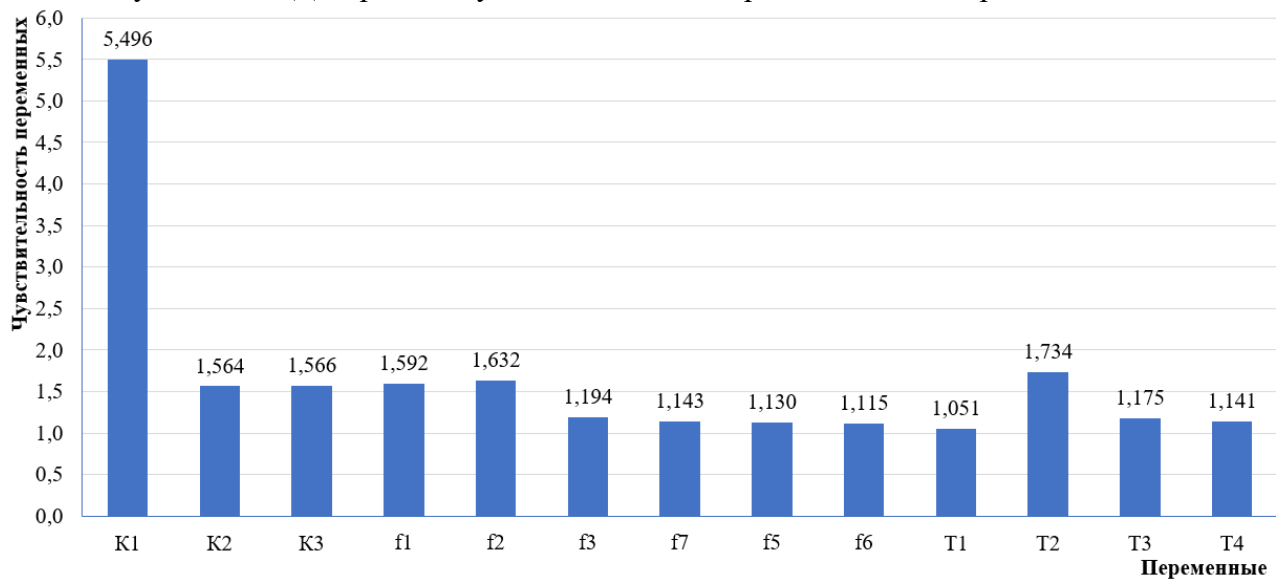


Рисунок 4.28 – Диаграммы чувствительности переменных с совокупной выборкой

Номограммы зависимостей тепловых потерь через ограждающие конструкции от данных переменных представлены на рисунках 4.29-4.31.

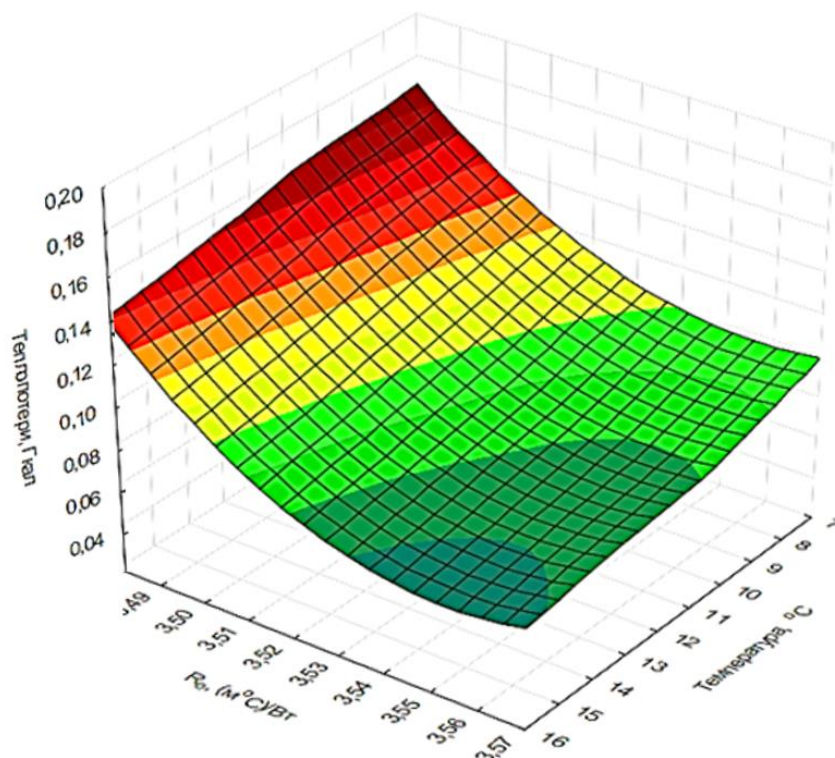


Рисунок 4.29 – Номограмма зависимости тепловых потерь от температуры наружного воздуха и приведенного сопротивления теплопередаче через стеновое ограждение

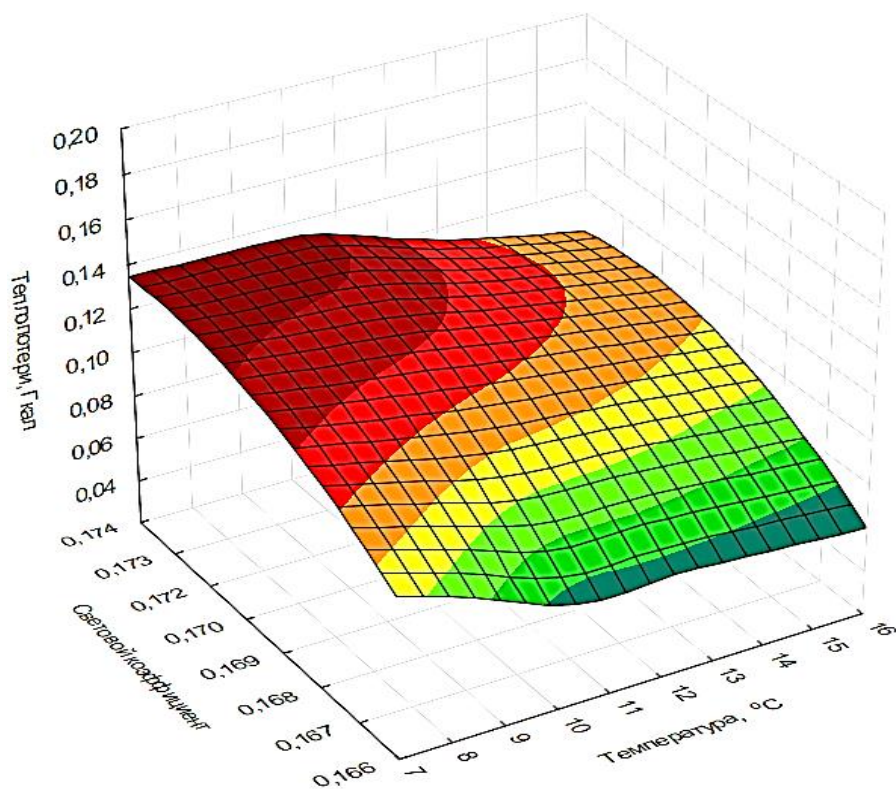


Рисунок 4.30 – Номограмма зависимости тепловых потерь от температуры наружного воздуха и светового коэффициента

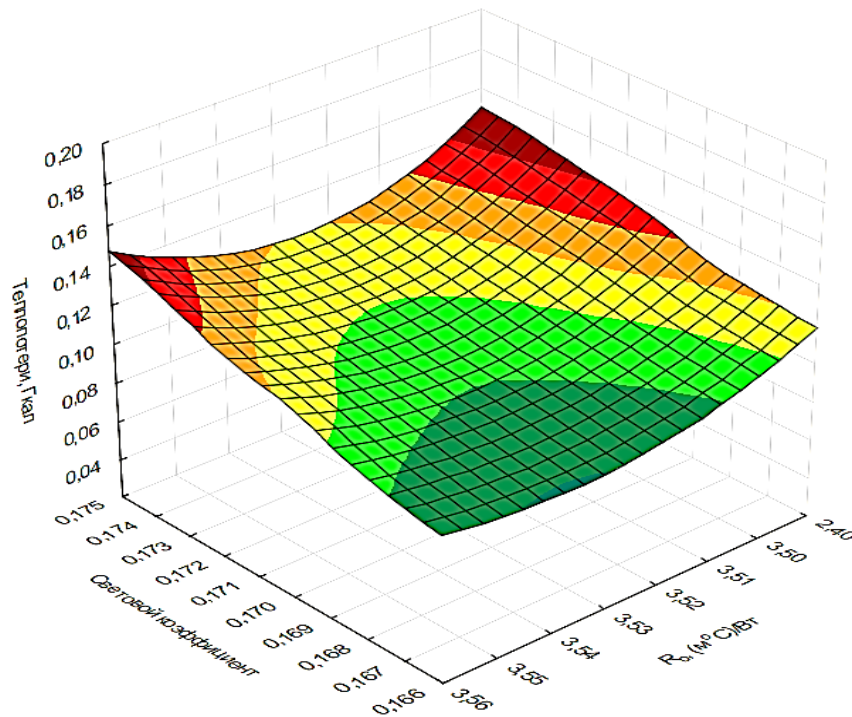


Рисунок 4.31 – Номограмма зависимости тепловых потерь от светового коэффициента и приведенного сопротивления теплопередаче через стеновое ограждение

Номограммы, представленные на рисунках 4.29-4.31, демонстрируют закономерные изменения тепловых потерь как от температуры наружного воздуха, так и эксплуатационных характеристик здания. Более подробные значения этих переменных при формировании набора данных для прогнозирования тепловых потерь будет способствовать улучшению точности прогнозов и оптимизации энергетической эффективности зданий, возведенных из газобетонных материалов.

На основании полученных данных сформированы коррекционные коэффициенты, позволяющие повысить точность прогнозов при измерении исходных параметров набора данных, которые составляют: для тренировки – 0,9502; для тестирования – 0,9251; для валидации – 0,9233.

Таким образом, нейросетевые технологии демонстрируют свою эффективность не только в обеспечении точности прогнозов, но и в способности адаптироваться к изменяющимся условиям и динамике процессов. Этот подход не только содействует оперативному управлению ресурсами и оборудованием, но и обеспечивает более долгосрочное и устойчивое функционирование объектов. Таким образом, внедрение и использование искусственных нейронных сетей в

прогнозировании на стадии проектирования становится ключевым аспектом повышения эффективности инженерного управления в области капитального строительства.

4.5. Выводы по четвертой главе

1. Обучена и протестирована модель ИНС с разным числом нейронов на внутреннем слое сети, применяя многослойный персептрон, с целью определения оптимального количества нейронов путем анализа среднеквадратичной ошибки (MSE) и сравнения прогнозируемых значений тестовых данных с фактическими значениями. Было установлено, что наилучшая точность модели ИНС достигается при использовании двух скрытых слоев сети, каждый из которых содержит 20 нейронов, при этом достигается наименьшая ошибка как на тренировочном, так и на тестовом наборе данных, а значения коэффициентов корреляции R превышают 95% для всех этапов.

2. Обучена и протестирована модель машинного обучения на основе библиотеки `scikit-learn`, демонстрирующая оценку качества модели на тестовых данных для каждой части данных (фолда) в диапазоне от 0,88 до 0,93.

3. Проведен детальный анализ результатов экспериментов и тестирований ИНС и модели машинного обучения на наборе данных, на основании которого сделаны выводы о том, какая модель является наиболее эффективной для решения задачи прогнозирования потерь теплоты через ограждающие конструкции, в данном случае является модель ИНС.

4. Произведена оптимизации точности прогнозирования модели на основе искусственных нейронных сетей, при которой определены наиболее чувствительными переменные для прогноза тепловых потерь через ограждающие конструкции: температура наружного воздуха ($K1$), световой коэффициент ($T2$) и приведенное сопротивление теплопередаче стены без учета остекления ($f2$), на основе которых сформированы коррекционные коэффициенты, позволяющие повысить точность прогнозов при измерении исходных параметров набора данных.

5. РАЗРАБОТКА МЕТОДА УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ОБЪЕКТОВ КАПИТАЛЬНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

5.1. Управление жизненным циклом объекта капитального строительства на этапе проектирования

5.1.1. Прогнозирование теплопотерь здания через ограждающие конструкции с учетом применяемой перемычки

Подход к управлению жизненным циклом объектов капитального строительства, разработанный в данном исследовании, базируется на применении обученной модели ИНС для определения тепловых потерь через ограждающие конструкции с учетом применяемых перемычек для оконных проемов.

В качестве исходных данных были приняты расчетные эксплуатационные характеристики проектируемого здания из газобетонных блоков в г. Аль-Рамади (Ирак) (рисунки 5.1 и 5.2) с различным типом перекрытия оконных проемов:

- перемычка из U-образных блоков;
- перемычка с двумя стеклокомпозитными стержнями и лентами из углеродных волокон по шву;
- перемычка с двумя стальными стержнями и лентами из углеродных волокон по шву.



Рисунок 5.1 – 3D-модель проектируемого многоквартирного дома



Рисунок 5.2 – План типового этажа многоквартирного дома: n – номер этажа

Для прогнозирования используется разработанная в п. 4.1. модель ИНС с 20 нейронами на внутреннем слое сети, которая позволяет предсказать теплопотери с учетом различных параметров здания и климатических условий района.

Результаты прогнозирования тепловых потерь через ограждающие конструкции с принятым вариантом технического решения ограждения с перемычкой с двумя стеклокомпозитными стержнями и лентами из углеродных волокон по шву представлены на рисунке 5.3.

Из данных, представленных на рисунке 5.6, можно сделать вывод о том, что перемычка с двумя стеклокомпозитными стержнями и лентами из углеродных волокон по шву демонстрирует наименьшие прогнозируемые теплопотери по сравнению с другими типами перемычек, что указывает на более высокую эффективность в удержании тепла и лучшую теплоизоляцию данного варианта. При этом перемычка из U-образных блоков показывает наибольшие прогнозируемые теплопотери по сравнению с другими типами перемычек.

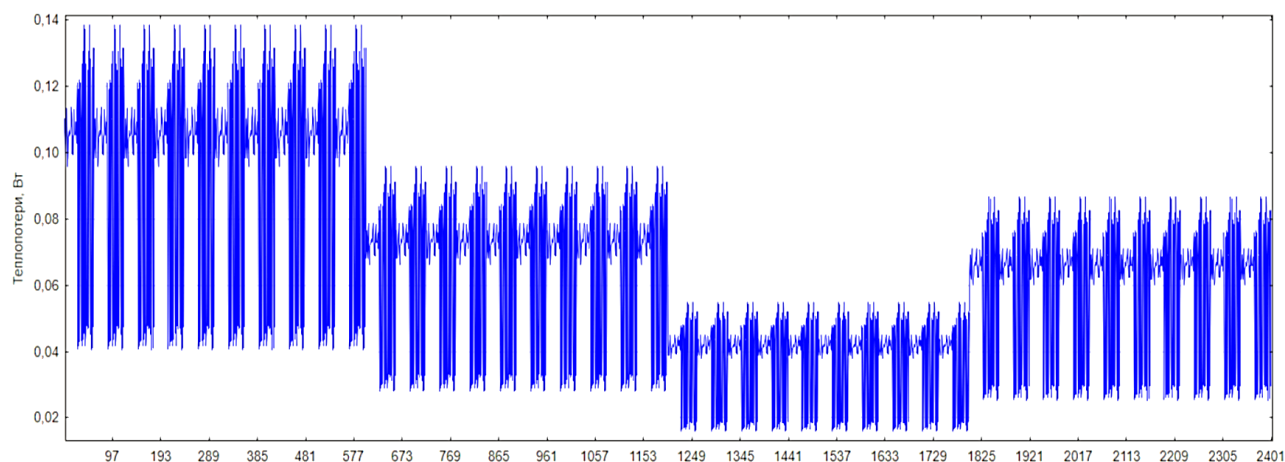


Рисунок 5.3 – График распределения прогнозируемых тепловых потерь за отопительный сезон для здания в г. Аль-Рамади (Ирак) с принятым вариантом технического решения ограждения с перемычкой с двумя стеклокомпозитными стержнями и лентами из углеродных волокон по шву

Исходя из этих результатов, можно сделать вывод, что использование стеклокомпозитных стержней может быть наиболее предпочтительным с точки зрения снижения тепловых потерь в здании.

5.1.2. Оценка экономической эффективности прогнозирования тепловых потерь здания через ограждающие конструкции с учетом применяемой перемычки

Проведена оценка экономической эффективности прогнозирования тепловых потерь здания через ограждающие конструкции с учетом применяемой перемычки. Основной целью данного анализа является определение наиболее экономически выгодного варианта перемычки для минимизации тепловых потерь и связанных с этим эксплуатационных затрат при строительстве и эксплуатации здания. В рамках исследования рассматриваются три типа перемычек в составе ограждающей конструкции: перемычка из U-образных блоков (тип 1), перемычка с двумя стеклокомпозитными стержнями и лентами из углеродных волокон по шву (тип 2), перемычка с двумя стальными стержнями и лентами из углеродных волокон по шву (тип 3) размерами $2400 \times 300 \times 200$ и $3400 \times 300 \times 200$ мм. Для каждого из них проводится оценка стоимости, количества, прогнозируемых тепловых потерь через стены и их суммарной стоимости, а также определяется процентная эффективность снижения тепловых потерь относительно общей стоимости тепловых потерь для каждого типа перемычки.

Экономическая эффективность применения перемычек различного типа в ограждающих конструкциях с учетом стоимости отопления приведена в таблице 5.1. Цены в таблице 5.1 указаны на январь 2024 г.

Таблица 5.1 – Экономическая эффективность применения перемычек различного типа в ограждающих конструкциях с учетом стоимости отопления

Тип перемычки	Количество по длине перемычки (мм), шт.		Стоимость 1 шт., руб.		Общая стоимость перемычек, руб.	Прогнозируемые теплопотери, Гкал	Стоимость, руб.	
	2400	3400	2400	3400			отопления	суммарная
Тип 1	440	160	2362,55	3343,43	1 574 470,8	194,6970	1 335 056,43	2 909 527,23
Тип 2			2887,12	4108,34	1 927 667,2	155,6776	1 067 496,56	2 995 163,76
			Экономическая эффективность, %				25	0,97
Тип 3			2763,70	3910,01	1 841 321,6	172,9992	1 186 272,47	3 027 594,07
			Экономическая эффективность, %				13	0,96

На основании данных, полученных при оценке экономической эффективности применения перемычек различного типа в ограждающих конструкциях с учетом стоимости отопления (таблица 5.1), можно сделать вывод о том, что применение разработанных перемычек позволяет снизить тепловые потери через ограждающие конструкции на 13-25% за счет высоких теплозащитных свойств. При этом несмотря на высокую стоимость самих перемычек срок их окупаемости составляет примерно 1 год за счет снижения теплопотерь и, соответственно, расхода на отопление.

Эффективность капитальных вложений (таблица 5.2) в реализованные технические решения ограждения здания по отношению к базовому варианту (тип 1) за отопительный сезон определена отношением стоимости сэкономленных теплопотерь к разнице прямых затрат на устройство элементов ограждения по вариантам.

Таблица 5.2 – Эффективность капитальных вложений в реализованные технические решения ограждения здания

Тип перемычки	Количество по длине перемычки (мм), шт.	Прямые затраты, руб.	Прогнозируемые теплопотери, Гкал	Стоимость теряемого тепла, руб.	Эффективность капвложений за отопительный сезон, %
Тип 1	600	1 574 471	194,6970	1 335 056	—
Тип 2		1 927 667	155,6776	1 067 497	$(1335056 - 1067497) / (1927667 - 1574471) = 76\%$
Тип 3		1 841 322	172,9992	1 186 272	$(1335056 - 186272) / (1841322 - 1574471) = 56\%$

Результаты расчета, представленные в таблице 5.2, подтверждают высокую эффективность возврата инвестиций в реализацию теплоэффективных технических решений в объеме 0,56-0,76 руб. на 1 руб. прямых затрат за отопительный сезон, что обеспечит выход на окупаемость капвложений за счет сокращения теплопотерь здания перспективе 1,3-1,8 года.

5.2. Апробация результатов исследований

Составные газобетонные перемычки были испытаны в производственных условиях на предприятии по производству изделий из автоклавного газобетона «Assad Babel For Building Technology» (г. Бавилон, Ирак). На данном предприятии выпущена партия составных перемычек с внешним полосовым и стержневым армированием для оконных и дверных проемов в стенах из газобетонных блоков.

При производстве работ использовались следующие материалы:

- газобетонные перемычки марки по средней плотности $D500$ и классом по прочности $B3,5$ завода «Аль- Масса» (Ирак);
- ленты из углеродных волокон Sikawrap 230C;
- стальные стержни A400;
- раствор для кладки газобетонных блоков.

Примеры составных перемычек с внешним полосовым и стержневым армированием для оконных и дверных проемов, выпущенных на предприятии «Assad Babel For Building Technology», приведены на рисунке 5.4.



Рисунок 5.4 – Примеры составных перемычек с внешним полосовым и стержневым армированием

Испытания составных перемычек из газобетонных блоков с внешним полосовым и стержневым армированием были проведены в производственных условиях на предприятии «Factory for production lightweight blocks» при строительстве многоквартирного дома по ул. Аль-Джарайши в г. Аль-Рамади, мухафаза Анбар, Ирак.

На указанном объекте были проведены работы по установке составных газобетонных перемычек над оконными проемами в наружных стенах из газобетонных блоков. Выбор типа перемычки основывался на разработанной модели ИНС для данного здания, описанной в п. 5.1.1.

При производстве работ использовались следующие материалы и оборудование:

- газобетонные перемычки марки по средней плотности $D500$ и классом по прочности $B3,5$ завода «Аль- Масса» (Ирак);
- ленты из углеродных волокон Sikawrap 230C;

- стальные стержни А400;
- раствор для кладки газобетонных блоков.

Подготовка составных газобетонных перемычек для оконных и дверных проемов приведена на рисунке 5.5.

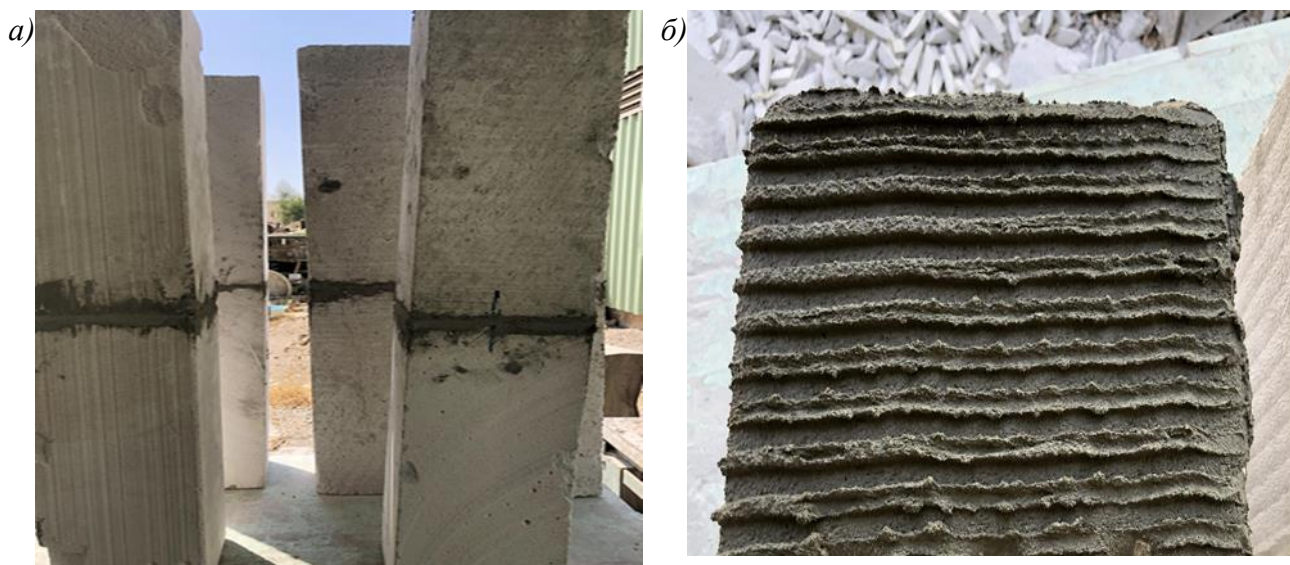


Рисунок 5.5 – Подготовка составных перемычек: *а* – склеивание газобетонных перемычек и их вертикальная установка; *б* – нанесение раствора

Имеются акты о внедрении результатов диссертационной работы следующих предприятий:

- Завод по производству изделий из автоклавного газобетона «Assad Babel For Building Technology» (г. Бавилон, Ирак) по выпуску партии составных перемычек из газобетонных блоков (приложение И);
- «Factory for production lightweight blocks» (г. Аль-Рамади, Ирак) по установке составных газобетонных перемычек над оконными проемами в наружных стенах из газобетонных блоков (приложение К).

Теоретические и экспериментальные положения диссертационной работы используются в учебном процессе при подготовке бакалавров по направлению 08.03.01 – «Строительство»; магистрантов по направлению 08.04.01 – «Строительство» (приложение Л).

Формализация разработанной технологии анализа, ранжирования и количественной оценки эффективности вариантно проектируемых технических решений ограждающих конструкций, обеспечивающей рациональное управление жизненным циклом объекта строительства по показателю минимизации прогнозируемых нейросетью тепловых потерь здания при его строительстве, обновлении и реконструкции осуществлена в виде дизайн-схемы, представленной на рисунке 5.6.

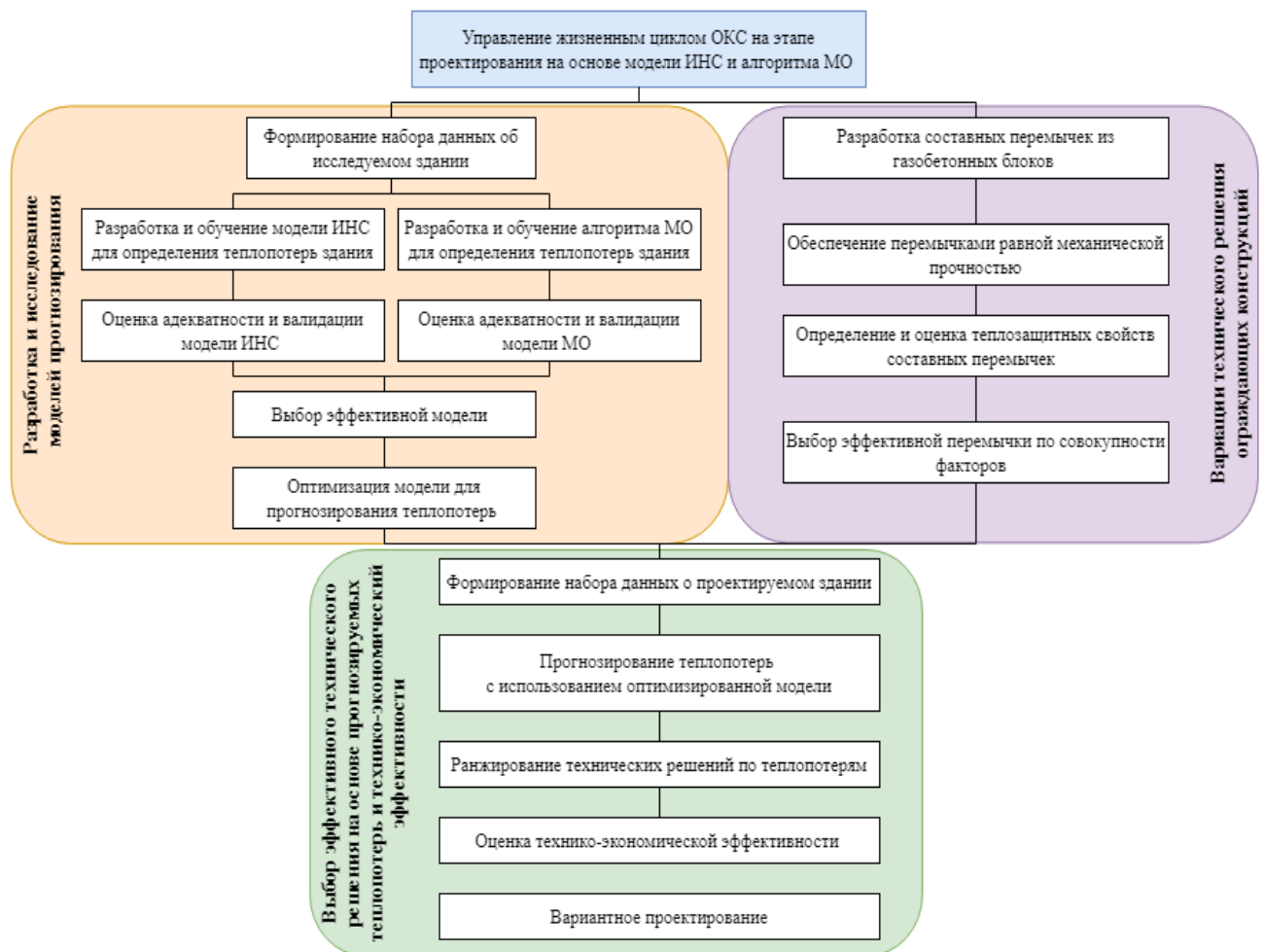


Рисунок 5.6 – Дизайн-схема управления жизненным циклом объектов капитального строительства на этапе проектирования нейросетевым прогнозированием тепловых потерь здания

В качестве структурообразующих факторов дизайн-схемы (рисунок 5.9) принимаются: разработка и исследование модели прогнозирования (формирование набора данных об исследуемом объекте, разработка и обучение модели ИНС и МО для определения тепловых потерь здания; оценка адекватности и

валидации моделей ИНС и МО, выбор эффективной модели и ее оптимизация для прогнозирования теплопотерь здания); вариации технического решения ограждающих конструкций (разработка составных перемычек из газобетонных блоков, обеспечение перемычками равной механической прочностью; определение и оценка теплозащитных свойств составных перемычек, выбор эффективной перемычки по совокупности факторов); выбор эффективного технического решения на основе прогнозируемых теплопотерь и технико-экономической эффективности (формирование набора данных о проектируемом объекте, прогнозирование теплопотерь с использованием оптимизированной модели, ранжирование технических решений по теплопотерям, оценка технико-экономической эффективности, вариантное проектирование).

5.3. Выводы по пятой главе

1. Разработан метод управления жизненным циклом зданий со стенами из газобетонных блоков на этапе проектирования, базирующийся на применении искусственных нейронных сетей и позволяющий прогнозировать тепловые потери через ограждающие конструкции с учетом применяемых элементов стенового ограждения.

2. Обоснована экономическая эффективность предлагаемого подхода к управлению жизненным циклом зданий на этапе проектирования. На основании данных, полученных при оценке экономической эффективности применения перемычек различного типа в ограждающих конструкциях с учетом стоимости отопления, можно сделать вывод о том, что применение разработанных перемычек позволяет снизить тепловые потери через ограждающие конструкции на 13-25% за счет высоких теплозащитных свойств. При этом несмотря на высокую стоимость самих перемычек срок их окупаемости составляет примерно 1 год за счет снижения теплопотерь и, соответственно, расхода на отопление.

3. Результаты исследований апробированы в производственных условиях на предприятии по производству изделий из автоклавного газобетона «Assad Babel

For Building Technology» (г. Вавилон, Ирак), где была выпущена партия составных перемычек с внешним полосовым и стержневым армированием для оконных и дверных проемов в стенах из газобетонных блоков; на предприятии «Factory for production lightweight blocks» при строительстве пятиэтажного жилого дома по ул. Аль-Джарайши в городе Аль-Рамади, мухафаза Анбар, Ирак, где были проведены работы по установке составных газобетонных перемычек над оконными проемами в наружных стенах из газобетонных блоков.

4. Разработана дизайн-схема управления жизненным циклом объектов капитального строительства нейросетевым прогнозированием теплопотерь здания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования. Дополнены теоретические представления о возможности применения искусственных нейронных сетей и метода машинного обучения для прогнозирования тепловых потерь здания с учетом его конструктивных, объемно-планировочных решений и климатических показателей.

Обосновано и экспериментально подтверждено организационно-техническое решение, заключающееся в совершенствовании механизмов управления жизненным циклом объектов капитального строительства с разработкой моделей искусственных нейронных сетей и машинного обучения, позволяющее осуществлять прогнозирование теплопотерь здания и оценку влияния на них входных параметров, включая метеорологические данные, теплоизоляционные характеристики материалов, данные объемно-планировочных и конструктивных решений объектов капитального строительства.

Обоснованы параметры и разработаны модели ИНС и алгоритма МО для оценки и прогнозирования тепловых потерь через ограждающие конструкции здания, позволяющие установить количественное влияние конструктивных и объемно-планировочных решений здания на прогнозируемые теплопотери.

Предложен механизм оптимизации модели ИНС посредством оценки влияния входных параметров набора данных на прогнозируемые теплопотери и определения коррекционных коэффициентов.

Разработаны научно-теоретические основы технологии управления жизненным циклом объектов капитального строительства, базирующейся на нейросетевом прогнозировании, тепловых потерях здания и предложении рациональных технических решений по минимизации теплопотерь.

Обоснована и экспериментально подтверждена целесообразность и эффективность применения составных перемычек из газобетонных блоков в качестве рациональных технических решений ограждающих конструкций зданий,

обеспечивающих прогнозируемое снижение теплопотерь здания на 13-25 % за счет отсутствия теплопроводных включений в виде арматурного каркаса и тяжелого бетона при требуемой механической обеспеченности.

Теоретические и экспериментальные результаты диссертационной работы могут быть **рекомендованы** для внедрения в практику деятельности проектных организаций, строительных и энергоаудиторских компаний, а также могут быть использованы в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистрантов по направлению «Строительство».

Перспективы дальнейших исследований: целесообразно рассматривать в направлении разработки и обучения моделей искусственных нейронных сетей и алгоритма машинного обучения с учетом более обширного набора данных, включающие данные о дефектах здания и анализа их влияния на прогнозируемые потери теплоты через ограждающие конструкции, а также интегрированных систем управления, позволяющих осуществлять мониторинг и оптимизацию энергопотребления в реальном времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Eleftheriadis, S.** Life cycle energy efficiency in building structures: A review of current developments and future outlooks based on BIM capabilities [Text] / S. Eleftheriadis, D. Mumovic, P. D. Greening // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2017. – Vol. 67. – P. 811–825.
2. **Fedosov, S. V.** Design of buildings with energy-efficient structures from the perspective of life cycle management of the construction object [Text] / S. V. Fedosov, V. N. Fedoseev, I. A. Zaitseva // Smart Composite in Construction. – 2023. – Vol. 4, No. 4. – P. 20-29.
3. **Голубцов, Н. В.** Энергетическая эффективность зданий и сооружений в аспекте управления их жизненным циклом [Текст] / Н. В. Голубцов, Л. Г. Ефремов, Р. Г. Исмятуллин // Вестник Чувашского университета. – 2013. – № 1. – С. 247-255.
4. **Заяров, Ю. В.** Управление уровнем безопасности на разных этапах жизненного цикла зданий и сооружений [Текст] / Ю. В. Заяров, Ю. И. Пимшин // Безопасность ядерной энергетики : тезисы докладов XIV Международной научно-практической конференции. – Волгодонск: Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ». – 2018. – С. 146-147.
5. **Чулков, В. О.** Проектирование ограждающих конструкций жилого здания с использованием системы несъемной опалубки как элемент управления жизненным циклом строительного объекта [Текст] / В. О. Чулков, Р. Р. Аманов, И. Бабаева // Вестник евразийской науки. – 2020. – Т. 12(2). – С. 18.
6. **Khasreen, M.M.** Life-cycle assessment and the environmental impact of buildings: a review [Text] / M.M. Khasreen, P.F.G. Banfill, G.F. Menzies // Sustainability. – 2009. – P. 674-701.
7. **Singh, A.** Review of life-cycle assessment applications in building construction [Text] / A. Singh, A, G. Berghorn, S. Joshi [et al.] // J Archit Eng. – 2011. – Vol. 17. – P. 15-23.

8. **Хроменок, Н. В.** Управление экологическим риском на жизненном цикле зданий [Текст] / Н. В. Хроменок, М. Ю. Слесарев // Актуальные проблемы строительной отрасли и образования - 2023 : Сборник докладов IV Национальной научной конференции. – Москва: Московский государственный строительный университет (национальный исследовательский университет). – 2024. – С. 587-591.

9. **Perez, N.** The influence of construction materials on the life cycle energy use and carbon dioxide emission of medium sized commercial buildings [Text] / N. Perez, G. Baird, A. Buchanan // Proceedings of the World Conference Sustainable Building Conference. – 2008. – P. 244–251.

10. **Puskas, A.** Environmental impact of masonry and RC frame structures [Text] / A. Puskas, J. Virag, L. M. Moga // Advances in Environmental Sciences, Development and Chemistry. – 2014. – P. 324– 329.

11. **Danatzko, J. M.** Sustainable structural design methodologies [Text] / J. M. Danatzko, H. Sezen // Pract Period Struct des Constr. – 2011. – P. 186-190.

12. **Anderson, J. E.** A life cycle inventory of structural engineering design strategies for greenhouse gas reduction [Text] / J. E. Anderson, R. Silman // Struct Eng Intern. – 2009. – Vol. 19(3). – P. 283-288.

13. **СП 48.13330.2011** Организация строительства. Актуализированная редакция СНиП 12-01-2004 (с Изменением N 1) [Текст]. – Введ. 20.05.2011. – М.: Минрегион России. – 2010.

14. **Опарина, Л. А.** Системный подход к организации жизненного цикла энергоэффективных зданий [Текст] / Л. А. Опарина // Жилищное строительство. – 2014. – № 6(50). – С. 12-15.

15. **Опарина, Л. А.** Построение матрицы нормативно-правовой базы проектирования, строительства и эксплуатации энергоэффективных зданий [Текст] / Л. А. Опарина // Энергосбережение и водоподготовка. – 2011. – №4 (72). – С.22-25.

16. **Опарина, Л. А.** Техничко-экономическое обоснование утепления стен зданий [Текст] / Л. А. Опарина // XVI Международная научно-практическая конференция «Информационная среда вуза». – Иваново: Иван. гос. архит.-строит. ун-т. – 2010. – С. 364-370.

17. **Ibn-Mohammed, T.** Operational vs. embodied emissions in buildings – a review of current trends [Text] / T. Ibn-Mohammed, R. Greenough, S. Taylor // Energy Build. – 2013. – Vol. 66. – P. 232-245.

18. **Takano, A.** The effect of material selection on life cycle energy balance: a case study on a hypothetical building model in Finland [Text] / A. Takano, S.K. Pal, M. Kuittinen // Build Environ. – 2015. – Vol. 89. – P. 192-202.

19. **Miller, D.** The contribution of structural design to green building rating systems: An industry perspective and comparison of life cycle energy considerations [Text] / D. Miller, J.-H. Doh, K. Panuwatwanich // Sustain Cities Soc. – 2015. – Vol. 16. – P. 39-48.

20. **Гуринов, А. И.** Управление жизненным циклом здания на основе информационного моделирования и задачи подготовки кадров [Текст] / А. И. Гуринов // Вестник гражданских инженеров. – 2015. – № 5(52). – С. 264-272.

21. **Баронин, С. А.** Оценка совокупной стоимости владения жилой недвижимостью в жизненных циклах зданий как перспективный инструмент управления энергоэффективностью [Текст] / С. А. Баронин, В. С. Гребенщиков, А. Г. Янков // Недвижимость: экономика, управление. – 2015. – № 3. – С. 36-40.

22. **Куцыгина, О. А.** Развитие ценообразования в строительной отрасли и управление жизненным циклом зданий [Текст] / О. А. Куцыгина, Г. Н. Галицын // Экономика строительства. – 2017. – № 6(48). – С. 12-25.

23. **Хуссейн, А. М. С. А. Д.** Внедрение системы управления жизненным циклом зданий и сооружений с использованием технологий информационного моделирования (ТИМ) в инженерном образовании в Республике Ирак [Текст] / А. М. С. А. Д. Хуссейн, М. А. Фахратов, К. В. Полосина // Актуальные проблемы строительной отрасли и образования - 2023: Сборник докладов IV Национальной

научной конференции. – Москва: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. – 2024. – С. 809-815.

24. **Alwan, Z.** The importance of embodied energy in carbon footprint assessment [Text] / Z. Alwan, P. Jones // Struct Surv. – 2014. – Vol. 32(1). – P. 49-60.

25. **Succar, B.** Building information modelling framework: a research and delivery foundation for industry stakeholders [Text] / B. Succar // Autom. Constr. – 2009. – Vol. 18. – P. 357-375.

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

27. **Шилов, Л. А.** Оценка технического состояния строительных конструкций путем сравнения информационных моделей на этапах жизненного цикла [Текст] / Л. А. Шилов, Д. В. Топчий, Л. А. Адамцевич // Строительство и архитектура. – 2024. – Т. 12, № 2(43). – С. 12-15.

28. **Сулейманова, Л. А.** Управление данными BIM-модели при оценке устойчивости жизненного цикла зданий [Текст] / Л. А. Сулейманова, И. С. Рябчевский // Университетская наука. – 2023. – № 1(15). – С. 117-119.

29. **Иванов, И. О.** Технологии BIM: новый инструмент управления жизненным циклом городских зданий и сооружений [Текст] / И. О. Иванов // Вестник Университета Правительства Москвы. – 2021. – № 2(52). – С. 34-39.

30. **Исупов, Н. С.** Возможности управления жизненным циклом объекта строительства с применением ТИМ [Текст] / Н. С. Исупов, М. М. Карманова, С. В. Придвижкин, Н. И. Фомин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер.: Строительство и архитектура. – 2023. – Т. 23, № 1. – С. 48-56.

31. **Шеина, С. Г.** Интеграция информационного моделирования жизненного цикла объекта капитального строительства [Текст] / С. Г. Шеина, Е. П. Горбанева, С. М. Агафонов, И. А. Косовцева // Научный журнал. Инженерные системы и сооружения. 2023. № 3 (53). С. 8-15.

32. **Arayici, Y.** Technology adoption in the BIM implementation for lean architectural practice [Text] / Y. Arayici, P. Coates, L. Koskela // Autom. Constr. – 2011. – P. 189-195.

33. **Шеина, С. Г.** Нормативное регулирование и опыт внедрения BIM на различных этапах жизненного цикла объекта строительства в России [Текст] / С. Г. Шеина, С. Л. Шуйков // Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий. 2023. Т. 2. № 1. С. 4-11.

34. **Jrade, A.** Integrating building information modelling with sustainability to design building projects at the conceptual stage [Text] / A. Jrade, F. Jalaei // Build Simul. – 2013. – Vol. 6. – P. 429-444.

35. **Золина, Т. В.** Цифровизация предпроектной и проектной стадий в реализации инвестиционно-строительного проекта многофункционального жилого комплекса [Текст] / Т. В. Золина, Н. В. Купчикова, К. Е. Джантазаева, Е. Е. Купчиков // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2022. – № 3(41). – С. 144-148.

36. **Екимовская, В. А.** Инжиниринговая схема управления строительством на основе контрактов жизненного цикла здания [Текст] / В. А. Екимовская // Дни студенческой науки: сборник докладов научно-технической конференции по итогам научно-исследовательских работ студентов филиала НИУ МГСУ. – Москва: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. – 2021. – С. 55-56.

37. **Ding, G. K. C.** Sustainable construction-role of environmental assessment tools [Text] / G. K. C. Ding // J Environ. Manag. – 2008. – Vol. 86. – P. 451-464.

38. **Kohler, K.** Life cycle analysis of the built environment [Text] / K. Kohler, S. Moffatt // UNEP Ind Environ. – 2003. – P. 17-21.

39. **Lu, S. R.** APlying building information modelling in environmental impact assessment for urban deep excavation projects [Text] / S. R. Lu, I. C. Wu, B. C. Hsiung // Gerontechnology, 11 (2009), p. 2.

40. **Ли, Ц.** Текущая ситуация и развитие управления проектами «зеленого» строительства [Текст] / Ц. Ли, Л. И. Миронова // Инновации и инвестиции. – 2023. – № 5. – С. 399-402.

41. **O'Reilly, A.** Using BIM as a tool for cutting construction waste at source [Text] / A. O'Reilly // Constr. Res. Innov. – 2012. – Vol. 3. – P. 28-31.

42. **Zeng, M. N.** Future of green BIM designing and tools [Text] / M. N. Zeng // Adv. Mater. Res. – 2012. – Vol. 374. – P. 2557-2561.

43. **Rekola, M.** The role of design management in the sustainable building process [Text] / M. Rekola, T. Mäkeläinen, T. Häkkinen // Archit. Eng. Des Manag. – 2012. – Vol. 8. – P. 78-89.

44. **Park, J. H.** Building information modelling based energy performance assessment system – an assessment of the Energy Performance Index in Korea [Text] / J. H. Park, J. L. Park, J. H. Kim, J. J. Kim // Constr. Innov.: Inf. Process Manag. – 2012. – Vol. 12. – P. 335-354.

45. **Гущина, Е. С.** Устойчивость комплексной жилой застройки на основе управления стоимостью эколого-ориентированных жизненных циклов зданий [Текст] / Е. С. Гущина, С. А. Баронин // Устойчивость развития территорий в инвестиционно-строительной сфере в условиях турбулентной экономики : материалы I Международной научно-практической конференции. – Пенза: Пензенский государственный университет архитектуры и строительства. – 2022. – С. 132-138.

46. **Суворова, М. О.** Совершенствование системы управления жизненным циклом комплексной застройки территорий с позиции низкоуглеродного развития [Текст] / М. О. Суворова, А. Е. Наумов, В. В. Строкова // Строительство и архитектура. – 2023. – Т. 11, № 2. – С. 3.

47. **Мищенко, А. В.** Реализация BIM полного жизненного цикла объекта недвижимости [Текст] / А. В. Мищенко, Е. П. Горбанева // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2021. – № 11 (755). – С. 95-109.

48. **Cole, R. J.** Life-cycle energy use in office buildings [Text] / R. J. Cole, P. J. Kernan // Build Environ. – 1996. – Vol. 31. – P. 307-317.
49. **Yang, J.** Smart and sustainable built environment [Text] / J. Yang, P.S. Brandon, T. Sidwell, A.C. Sidwel. – Blackwell Publishing. – 2005. – 368 p.
50. **Reddy, B. V. V.** Embodied energy of common and alternative building materials and technologies [Text] // B. V. V. Reddy, K. S. Jagadish // Energy Build. – 2003. – Vol. 35. – P. 129-137.
51. **Развеева, И. Ф.** К вопросу управления жизненным циклом объектов строительства за счет информационных технологий [Текст] / И. Ф. Развеева, Д. В. Мавзолеевский, А. А. Погребняк, А. Д. Гладкова // Города России: проблемы строительства, инженерного обеспечения, благоустройства и экологии : сборник статей XXV Международной научно-практической конференции. – Пенза: Пензенский государственный аграрный университет. – 2023. – С. 318-321.
52. **Ortiz, O.** Sonnemann Sustainability in the construction industry: a review of recent developments based on LCA [Text] / O. Ortiz, F. Castells, G. // Constr. Build Mater. – 2009. – Vol. 23. – P. 28-39.
53. **Iddon, C. R.** Embodied and operational energy for new-build housing: a case study of construction methods in the UK [Text] / C. R. Iddon, S. K. Firth // Energy Build. – 2013. – Vol. 67. – P. 479-488.
54. **Ajayi, S. O.** Life cycle environmental performance of material specification: a BIM-enhanced comparative assessment [Text] / S. O. Ajayi, L. O. Oyedele, B. Ceranic // Int J Sustain Build Technol Urban Dev. – 2015. – P. 14-24.
55. **Dixit, M. K.** Identification of parameters for embodied energy measurement: a literature review [Text] / M. K. Dixit, J. L. Fernandez-Solis, S. Lavy, C. H. Culp // Energy Build. – 2010. – Vol. 42. – P. 1238-1247.
56. **Мохначев, С. А.** Влияние цифровой трансформации на управление инвестиционно-строительными проектами [Текст] / С. А. Мохначев, С. Г. Белослудцева, Д. А. Черемных // Актуальные проблемы развития городов : сборник статей по материалам открытой VII международной очно-заочной

научно-практической конференции молодых ученых и студентов. – Макеевка: Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, 2023. – С. 69-72.

57. **Милорадов, К. А.** Цифровые технологии управления жизненным циклом «интеллектуального здания» [Текст] / К. А. Милорадов // Проблемы и перспективы развития промышленности России: Сборник материалов шестой международной научно-практической конференции. – Москва: РУСАЙНС, 2020. – С. 151-155.

58. **Diaz, J.** Sustainable Construction AProach through Integration of LCA and BIM Tools [Text] / J. Diaz, L.A. Anton // Comput. Civ. Build Eng. – 2014. – P. 283-290.

59. **Moncaster, A. M.** A comparative review of existing data and methodologies for calculating embodied energy and carbon of buildings [Text] / A. M. Moncaster, J.-Y. Song // Int J Sustain Build Technol Urban Dev. – 2012. –Vol. 3 (1). – P. 26-36.

60. **Шеина, С. Г.** Нормативное регулирование и опыт внедрения BIM на различных этапах жизненного цикла объекта строительства в России [Текст] / С. Г. Шеина, С. Л. Шуйков // Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий. – 2023. – Т. 2, № 1. – С. 4-11.

61. **Танько, В. Д.** Тенденции цифровизации в строительной сфере [Текст] / В. Д. Танько, Д. А. Калинина, В. А. Савина // Экономика и предпринимательство. – 2021. – № 2 (127). – С. 184-187.

62. **Сыроваткина, Т. Н.** Цифровизация производственной инфраструктуры экономики строительства [Текст] / Т. Н. Сыроваткина // Фундаментальные исследования. – 2020. – № 4. – С. 104-108.

63. **Сулейманова, Л. А.** Реализация учетной политики в строительстве с использованием цифровых технологий [Текст] / Л. А. Сулейманова, П. В. Сапожников // Технологии информационного моделирования. Жизненный цикл объекта. – М.: Изд-во МГСУ, 2021. – С. 5-16.

64. **Постановление Правительства РФ** от 18.03.2021 г. № 331 «Об установлении случаев, при которых застройщиком, техническим заказчиком, лицом, обеспечивающим или осуществляющим подготовку обоснования инвестиций, и (или) лицом, ответственным за эксплуатацию объекта капитального строительства, обеспечиваются формирование и ведение информационной модели объекта капитального строительства» [Текст]. – 2021. – № 11. – С. 1823.

65. **Постановление Правительства РФ** от 15.09.2020 г. № 1431 «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» [Текст]. – 2020. – № 39. – С. 6030.

66. URL: <https://minstroyrf.gov.ru/press/v-minstroe-predstavili-dorabotannuyu-kontseptsuyu-vnedreniya-sistemy-upravleniya-zhiznennym-tsiklom-/>.

67. **Распоряжение правительства РФ** от 28.08.2003 г. № 1234-р «Об утверждении Энергетической стратегии России на период до 2020 года» [Текст]. – 2003. – № 36. – С. 3531.

68. **Шарманов, В. В.** Трудности поэтапного внедрения BIM [Текст] / В. В. Шарманов, А. Е. Мамаев, А. С. Болейко, Ю. С. Золотова // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2015. – № 10. – С. 108-120.

69. **Ghaffarianhoseini, A.** Building Information Modelling (BIM) uptake: clear benefits, understanding its implementation, risks and challenges [Text] / A. Ghaffarianhoseini, J. Tookey, A. Ghaffari-anhoseini // Renew. Sustain. Energy Rev. – 2017. – Vol. 75. – P. 1046-1053.

70. **Пурс, Г. А.** Опыт Великобритании в области внедрения BIM-технологии в строительстве [Текст] / Г. А. Пурс // БСТ: бюллетень строительной техники. – 2017. – № 9. – С. 20-23.

71. **Абрамян, С. Г.** Проблемы внедрения BIM-технологий в строительном секторе: обзор научных публикаций [Текст] / С. Г. Абрамян, А. В. Котляревская, О. В. Оганесян // Инженерный вестник Дона. – 2019. – № 9. – URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/N9y2019/6202>.

72. **Миндзаева, М. Р.** Сравнительный анализ зарубежных стандартов экологического строительства и их влияния на формирование российских экостандартов [Текст] / М. Р. Миндзаева, Ю. В. Горгорова // Инженерный вестник Дона. – 2013. – № 4. – URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/2146.

73. **Богословский, В. Н.** Тепловой режим здания [Текст] / В. Н. Богословский. – М.: Стройиздат, 1979. – 248 с.

74. **Богословский, В. Н.** Три аспекта концепции ЗЭИЭ и особенности переходного периода [Текст] / В. Н. Богословский // Проблемы строительной теплофизики и энергосбережения в зданиях: сб. докл. науч.-практ. конф. – М.: НИИСФ РААСН. – 1997. – Т.1. – С. 7–9.

75. **Fanger, P. O.** Thermal comfort [Text] / P. O. Fanger. – McGraw Hill. – 1970. – 244 p.

76. **Фангер, П. О.** Качество внутреннего воздуха в XXI веке: в поисках совершенства [Текст] / П. О. Фангер // АВОК. – 2000. – № 2. – С. 14–20.

77. **Табунщиков, Ю. А.** Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий [Текст] / Ю. А. Табунщиков, М. М. Бродач. – М.: АВОК–ПРЕСС. – 2002. – 194 с.

78. **Табунщиков, Ю. А.** Тепловая защита ограждающих конструкций зданий и сооружений [Текст] / Ю. А. Табунщиков, Д. Ю. Хромец, Ю. А. Матросов. – М.: Стройиздат, 1986. – 380 с.

79. **Табунщиков, Ю. А.** Энергоэффективные здания [Текст] / Ю. А. Табунщиков, М. М. Бродач, Н. В. Шилкин. – М.: АВОК-ПРЕСС. – 2003. – 200 с.
80. **Табунщиков, Ю. А.** Лицом к проблеме энергосбережения [Текст] / Ю. А. Табунщиков // Архитектура и строительство Москвы. – 2010. – Т. 554. – № 6. – С. 2–13.
81. **Корниенко, С. В.** Повышение энергоэффективности зданий за счет совершенствования методов расчета температурно-влажностного режима ограждающих конструкций [Текст]: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.23.03. / С. В. Корниенко. – Волгоградский гос. техн. ун-т. – Волгоград, 2018. – 380 с.
82. **СТО 17532043-001-2005.** Нормы теплотехнического проектирования ограждающих конструкций и оценки энергоэффективности зданий [Текст]. – М.: РНТО строителей. – 2006.
83. **Ананьев, А. И.** Долговечность и энергоэффективность наружных стен из облегченной кирпичной кладки [Текст] / А. И. Ананьев, А. А. Ананьев // Academia. Архитектура и строительство. – 2010. – № 3. – С. 352–356.
84. **Сотников, А. Г.** Мониторинг микроклимата — основа создания эффективных систем и здания с минимальным энергопотреблением [Текст] / А. Г. Сотников // Инженерно-строительный журнал. – 2010. – № 7. – С. 47–52.
85. **Cheng, Y.** Thermal comfort models: A review and numerical investigation [Text] / Y. Cheng, J. Nin, N. Gao // Building and Environment. – 2012. – Vol. 47. – P. 13–22.
86. **Alajmi, A.** Energy audit of an educational building in a hot summer climate [Text] / A. Alajmi // Energy and Buildings. – 2012. – Vol. 47. – P. 122–130.
87. **Гагарин, В. Г.** Перспективы повышения энергетической эффективности жилых зданий в России [Текст] / В. Г. Гагарин, В. В. Козлов // Вестник МГСУ. – 2011. – № 3. – С. 192–200.
88. **Miranville, F.** Evaluation of the thermal resistance of a roof-mounted multi-reflective radiant barrier for tropical and humid conditions: Experimental study from

field measurements [Text] / F. Miranville, A. H. Fakra, S. Gnichard [and others] // Energy and Buildings. – 2012. – Vol. 48. – P. 79–90.

89. **Moreno-Munoz, A.** Distributed DC-UPS for Energy Smart Buildings [Text] / A. Moreno-Munoz, V. Pallarés-Lopez, R. J. Real-Calvo // Energy and Buildings. – 2011. – Vol. 43 (1). – P. 93–100.

90. **Mlakar, J.** Temperature and Humidity Profiles in Passive-house Building Blocks [Text] / J. Mlakar, J. Štrancar // Building and Environment. – 2013. – Vol. 60. – P. 185–193.

91. **Revel, G. M.** Development and Experimental Evaluation of a Thermography Measurement System for Real-Time Monitoring of Comfort and Heat Rate Exchange in the Built Environment [Text] / G. M. Revel, E. Sabbatini, M. Arnesalo // Measurement Science and Technology. – 2012. – Vol. 23. – P. 035005.

92. **Soares, N.** Laboratory and in-situ nondestructive methods to evaluate the thermal transmittance and behavior of walls, windows, and construction elements with innovative materials: A review [Text] / N. Soares, C. Martins, M. Gonçalves // Energy and Buildings. – 2019. – Vol. 182. – P. 88–110.

93. **Teni, M.** Review and comparison of current experimental approaches for in-situ measurements of building walls thermal transmittance [Text] / M. Teni, H. Krstic, P. Kosinski // Energy and Buildings. – 2019. – P. 109–117.

94. **Ficco, G.** U-value in situ measurement for energy diagnosis of existing buildings / G. Ficco, F. Iannetta, E. Ianniello // Energy and Buildings. – 2015. – Vol. 104. – P. 108–121.

95. **Larbi Youcef, M. H. A.** Quantitative diagnosis of insulation building walls of restored old constructions using active infrared thermography [Text] / M. H. A. Larbi Youcef, V. Feuillet, L. Ibos // Quantitative InfraRed Thermography Journal. – 2011. – Vol. 8(1). – P. 65–87.

96. **Корниенко, С. В.** Снижение тепловпотерь за счет совершенствования краевых зон ограждающих конструкций [Текст] / С. В. Корниенко // Жилищное строительство. – 2010. – № 3. – С. 31–32.

97. **François A.** Estimation of the thermal resistance of a building wall with inverse techniques based on rapid active in situ measurements and white-box or ARX black-box models [Text] / A. François, L. Ibos, V. Feuillet, J. Meulemans // *Energy & Buildings*. – 2020. – Vol. 226. – P. 111346.

98. **Johnston, D.** Quantifying the domestic building fabric 'performance gap' [Text] / D. Johnston, D. Miles-Shenton, D. Farmer // *Building Services Engineering Research and Technology*. – 2015. – Vol. 36(5). – P. 614-627

99. **Долгопятова, Д. Г.** Математическое моделирование экономических процессов [Текст] / Д. Г. Долгопятова. – М.: Моделирование, 1990. – 232 с.

100. **Бешелев, С. Д.** Математико-статистические методы экспертных оценок [Текст] / С. Д. Бешелев, Ф. Г. Гурвич. – М.: Статистика. – 1980. – 263 с.

101. **Розин, Б. Б.** Экономико-математические методы в планировании многоотраслевых комплексов и отраслей [Текст] / Б. Б. Розин. – Новосибирск, 1988. – 413 с.

102. **Ahmad, T.** A comprehensive overview on the data driven and large scale-based approaches for forecasting of building energy demand: A review [Text] / T. Ahmad, H. Chen, Y. Guo, J. Wang // *Energy Build.* – 2018. – Vol. 165. – P. 301-320.

103. **Ahmad, A. S.** A review on applications of ANN and SVM for building electrical energy consumption forecasting / A. S. Ahmad // *Renew. Sustain. Energy Rev.* – 2014. – Vol. 33. – P. 102-109.

104. **Fan, C.** Development of prediction models for next-day building energy consumption and peak power demand using data mining techniques [Text] / C. Fan, F. Xiao, S. Wang // *Appl. Energy*. – 2014. – Vol. 127. – P. 1-10.

105. **Fan, C.** A short-term building cooling load prediction method using deep learning algorithms [Text] / C. Fan, F. Xiao, Y. Zhao // *Appl. Energy*. – 2017. – Vol. 195. – P. 222.

106. **Fan, C.** Statistical investigations of transfer learning-based methodology for short-term building energy predictions [Text] / C. Fan // *Appl. Energy*. – 2019. – Vol. 262. – P. 114499.

107. **Fathi, S.** Machine learning applications in urban building energy performance forecasting: A systematic review [Text] / S. Fathi, R. Srinivasan, A. Fenner, S. Fathi // *Renew. Sustain. Energy Rev.* – 2020. – Vol. 133. – P. 110287.

108. **Harpham, C.** The effect of different basis functions on a radial basis function network for time series prediction: a comparative study *Neurocomputing* [Text] / C. Harpham, C.W. Dawson // *Neurocomputing*. – 2006. – P. 2161-2170.

109. **Heo, Y.** Calibration of building energy models for retrofit analysis under uncertainty [Text] / Y. Heo, R. Choudhary, G.A. Augenbroe // *Energy and Buildings*. – 2012. – Vol. 47. – P. 550-560.

110. **Kalogirou, S.** Estimation of Daily Heating and Cooling Loads Using Artificial Neural Networks *Proceedings of CLIMA 2000* [Text] / S. Kalogirou, G. Florides, C. Neocleous, C. Schizas // *International Conference September*. – 2001. – P. 15-18.

111. **Khayatian, F.** Application of neural networks for evaluating energy performance certificates of residential buildings [Text] / F. Khayatian, L. Sarto, G. Dall'O' // *Energy and Buildings*. – 2016. – Vol. 125. – P. 45-54.

112. **Leung, H.** Prediction of Noisy Chaotic Time Series Using an Optimal Radial Basis Function [Text] / H. Leung, T. Lo, S. Member, S. Wang // *Neural Network IEEE Transactions on Neural Networks*. – 2001. – Vol. 12. – P. 1163-1172.

113. **Seyedzadeh, S.** Machine learning for estimation of building energy consumption and performance: a review [Text] / S. Seyedzadeh, F.P. Rahimian, I. Glesk, M. Roper // *Visualization in Engineering*. – 2018. – Vol. 6. – P. 5.

114. **Wang, Z.** Random Forest based hourly building energy prediction [Text] / Z. Wang, Y. Wang, R. Zeng // *Energy and Buildings*. – 2018. – Vol. 171. – P. 11-25.

115. **Papadopoulos, S.** Evaluation of tree-based ensemble learning algorithms for building energy performance estimation [Text] / S. Papadopoulos, E. Azar,

W.-L. Woon, C. E. Kontokosta // Journal of Building Performance Simulation. – 2017. – P. 1-11.

116. URL: <https://www.weatherarchive.ru/Temperature/Belgorod/January-2023>.

117. **Богданова, Р. А.** Первичная оценка статистических данных в программе STATISTICA [Текст] / Р. А. Богданова, П. И. Казаева // Информация и образование: границы коммуникаций. – 2022. – № 14(22). – С. 157-162.

118. **Камашев, В. В.** Выбор оптимальных настроек нейронной сети при прогнозировании временного ряда в пакете статистика [Текст] / В. В. Камашев, Е. А. Кучерова, П. Н. Раскин // Молодежь. Наука. Современность: IV Всероссийская научно-практическая конференция. – Воткинск, 2017. – С. 107-109.

119. **Кленина, В. И.** Анализ временных рядов и прогнозирование на примере программы STATISTICA [Текст] / В. И. Кленина, Е. Н. Софинская, А. А. Зироян // Человеческий капитал. – 2015. – № 2(74). – С. 66-74.

120. **Deo, T. Y.** Data imputation and comparison of custom ensemble models with existing libraries like XGBoost, CATBoost, AdaBoost and Scikit learn for predictive equipment failure [Text] / T. Y Deo, A. Sanju // Materials Today: Proceedings. – 2023. – Vol. 72(3). – P. 1596-1604.

121. **Qu, C.** Machine learning software to learn negligible elements of the Hamiltonian matrix [Text] / C. Qu, P.L. Houston, Q. Yu// Artificial Intelligence Chemistry. – 2023. – Vol. 1(2). – P. 100025.

122. **Qu, C.** Machine learning classification can significantly reduce the cost of calculating the Hamiltonian matrix in CI calculations [Text] / C. Qu, P. L. Houston, Q. Yu // The Journal of Chemical Physics. – 2023. – Vol. 159(7). – P. 071101.

123. **Hastie, T.** The elements of statistical learning: data mining, inference, and prediction [Text] / T. Hastie, R. Tibshirani, J. H. Friedman // Springer Series in Statistics: Springer New York. – 2009. – Vol. 2. – P. 83-85.

124. **Ma, Sh.** Spatial prediction of soil salinity based on the Google Earth Engine platform with multitemporal synthetic remote sensing images [Text] / Sh. Ma, B. He, X. Ge, X. Luo // Ecological Informatics. – 2023. – Vol. 75. – P. 102111.

125. URL: <https://dom.mingkh.ru/belgorodskaya-oblast/belgorod/1148081>.
126. **Пожидаев, Ю. В.** Выбор оптимального числа интервалов гистограмм распределения случайных величин [Текст] / Ю. В. Пожидаев, Н. В. Ознобихина // *Металлургия: технологии, управление, инновации, качество : труды Всероссийской научно-практической конференции*. – Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2009. – С. 370-375.
127. **Патент на изобретение № 215740.** Составная ячеистобетонная перемычка // Л.А. Сулейманова, И.А. Погорелова, И.С. Рябчевский, А.А.Х. Обайди. Оpubл.: 23.12.22.
128. **Патент на изобретение № 221280.** Армированная перемычка из ячеистобетонных блоков [Текст] / Л.А. Сулейманова, И.А. Погорелова, И.С. Рябчевский, А.А.Х. Обайди. Оpubл.: 30.10.23.
129. **Патент на изобретение № 222449.** Армированная перемычка из ячеистобетонных балок / Л.А. Сулейманова, И.А. Погорелова, И.С. Рябчевский, А.А.Х. Обайди, Д.С. Аноприенко. Оpubл.: 26.12.23.
130. **Mousa, M.A.** Experimental and analytical study of carbon fiber-reinforced polymer (FRP)/autoclaved aerated concrete (AAC) sandwich panels [Text] / M. A. Mousa, N. Uddin // *Engineering Structures*. – 2009. – Vol. 31(10). – P. 2337-2344.
131. **Uddin, N.** Structural characterization of hybrid Fiber reinforced Polymer (FRP)-Autoclave Aerated Concrete (AAC) panels [Text] / N. Uddin, F. Fouad, U. K. Vaidya J. // *Reinf. Plast. Compos.* – 2006. – Vol. 25 (9). – P. 981–999.
132. **Uddin, N.** Design of hybrid fiber-reinforced polymer (FRP)/autoclave aerated concrete (AAC) panels for structural applications N. [Text] / N. Uddin, M. A. Mousa // *Woodhead Publ. Ser. Civ. Struct. Eng.* – 2013. – Vol. 2. – P. 226–246.
133. **Tuncer, E.** Behavior and design of FRP bonded autoclaved aerated concrete beams [Text] / E. Tuncer, B. Binici, E. Canbay // *Constr. Build. Mater.* – 2021. – Vol. 282. – P. 122712.

134. **Григорьева, Я. Е.** Прочность и деформативность железобетонных балок, усиленных углепластиком на стадии, близкой к исчерпанию несущей способности [Текст] : автореферат дис. ...канд. техн. наук: 05.23.01. / Я. Е. Григорьева. – Москва, 2013. – 24 с.

135. **Есипов, С. М.** Анализ методик проектирования усиления железобетонных конструкций композитными материалами [Текст] / С.М. Есипов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2015. – № 6. – С. 114-118.

136. **Меркулов, С. И.** Конструктивная безопасность эксплуатируемых железобетонных конструкций [Текст] / С. И. Меркулов // ПГС. – 2009. – № 4. – С. 53–54.

137. **Меркулов, С. И.** Увеличение несущей способности железобетонных изгибаемых конструкций усилением внешним армированием композитным материалом [Текст] / С. И. Меркулов, С. М. Есипов // БСТ: Бюллетень строительной техники. – 2018. – №2. – С. 25-26.

138. **Меркулов, С. И.** Экспериментальное исследование технологических воздействий на напряжённое состояние составных железобетонных конструкций [Текст] / С. И. Меркулов // Материалы вторых международных академических чтений «Новые энергосберегающие архитектурно-конструктивные решения жилых и гражданских зданий». – Орёл, 2003. – С. 227-228.

139. **Меркулов, С. И.** Экспериментальные исследования сцепления внешней композитной неметаллической арматуры с бетоном [Текст] / С. И. Меркулов, С. М. Есипов // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения. – Курск, 2017. – С. 93-97.

140. **Дворников, В. М.** Прочность и деформативность внецентренно сжатых усиленных под нагрузкой железобетонных элементов [Текст] : дис. ...канд. техн. наук: 05.23.01. / В. М. Дворников. – Курск, 2003. – 222 с.

141. **Смердов, Д. Н.** Оценка несущей способности железобетонных пролетных строений мостов, усиленных композитными материалами [Текст]:

автореф. дис...канд. техн. наук: 05.23.11. / Д. Н. Смердов. – Новосибирск, 2010. – 24 с.

142. **Бадалов,а Е. Н.** Экспериментальные исследования изгибаемых железобетонных конструкций, усиленных приклеиванием углепластиковых пластин [Текст] / Е. Н. Бадалова // Вестник Полоцкого государственного университета. сер. Ф. Прикладные науки. – 2009. – №12. – С. 45-50.

143. **Костенко, А. Н.** Прочность и деформативность центрально и внецентренно сжатых кирпичных и железобетонных колонн, усиленных угле- и стекловолокном [Текст] // автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. / А. Н. Костенко. – Москва, 2010. – 29 с.

144. **Юшин, А. В.** Анализ напряженно-деформированного состояния двухпролетных железобетонных балок, усиленных композитными материалами по наклонному сечению, с учетом нелинейности [Текст] / А. В. Юшин, В. И. Морозов // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 5. – С. 273.

145. **СТО 13613997-001-2011.** Усиление железобетонных конструкций композитными материалами фирмы Sika [Текст]. – М.: ОАО «ЦНИИПРОМЗДАНИЙ». – 2011.

146. **ASTM C39/C39M-21** Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens [Text]. – 2015. – 8 p.

147. **ASTM C642-97** Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete [Text]. – 2015. – 3 p.

148. **Сулейманова, Л. А.** Исследование напряженно-деформированного состояния перемычек газобетонных составных [Текст] / Л. А. Сулейманова, А. А. Х. Обайди, П. А. Амелин, Т. Мохаммедали // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2023. – №. 12. – С. 32-40.

149. **Обайди, А. А. Х.** Исследование прочностных свойств составных газобетонных перемычек с внешним композитным армированием [Текст] /

А.А.Х. Обайди // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. – 2023. – № 4(27). – С. 19-31.

150. **Memari, A. M.**, Eminaga A. Preliminary results on the use of GFRP as an external reinforcement for autoclaved aerated concrete [Text] / A. M. Memari, A. Eminaga // *Advances in Building Technology*. – 2002. – P. 865-872.

151. **DIN EN 846-9-2016.** Методы испытаний вспомогательных компонентов для каменной кладки. Часть 9. Определение стойкости на изгиб и на срез перемычек [Текст]. – Введ. 01.08.2016. – М, 2016. – 13 с.

152. URL: https://rus.sika.com/content/dam/dms/ru01/a/sikadur_-330.pdf.

153. **Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023681552.** Программа расчета приведенного сопротивления теплопередаче составных перемычек из ячеистобетонных блоков // Л. А. Сулейманова, И. А. Погорелова, И. С. Рябчевский, М. А. Богачева, А. А. Х. Обайди. Правообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова». Оpubл. 16.10.23.

154. **ГОСТ Р 54851-2011** Конструкции строительные ограждающие неоднородные. Расчет приведенного сопротивления теплопередаче [Текст]. – Введ. 15.01.2011. – М.: Стандартинформ. – 2012.

155. **Сулейманова, Л. А.** Исследование теплозащитных характеристик составных перемычек из газобетонных блоков / Л. А. Сулейманова, А. А. Х. Обайди // *Вестник Евразийской науки*. – 2023. – Т. 15, № 5. – URL: <https://esj.today/PDF/07SAVN523.pdf>.

ПРИЛОЖЕНИЯ

**Данные об эксплуатационных показателях многоквартирного дома
по ул. Квасова города Белгорода в январе 2023 г.**

№ помещения	K1, °C	K2, %	K3, м/с	f1, м²	f2, (м·°C)/Вт	f3, м²	f4, Вт/(м·°C)	T1	T2	T3, 1/ч	T4	T5, Гкал
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
101	-5	72	4,6	6,417	3,501	0,516	0,067854	0,424	0,162	2,96	0	0,480229
102	-5	72	4,6	6,705	3,479	0,858	0,112827	0,639	0,221	2,25	0,1	0,657362
103	-5	72	4,6	4,365	3,483	0,516	0,067854	0,562	0,225	2,73	0,1	0,346395
104	-5	72	4,6	4,365	3,483	0,516	0,067854	0,562	0,225	2,68	0,1	0,346395
105	-5	72	4,6	6,705	3,479	0,858	0,112827	0,639	0,221	2,48	0,1	0,657362
106	-5	72	4,6	6,417	3,501	0,516	0,067854	0,424	0,162	2,85	0,1	0,480229
107	-5	72	4,6	6,417	3,501	0,516	0,067854	0,424	0,162	2,1	0,1	0,480229
108	-5	72	4,6	6,705	3,479	0,858	0,112827	0,639	0,221	2,97	0,1	0,657362
109	-5	72	4,6	4,365	3,483	0,516	0,067854	0,562	0,225	2,09	0,1	0,346395
110	-5	72	4,6	4,365	3,483	0,516	0,067854	0,562	0,225	2,6	0,1	0,346395
111	-5	72	4,6	6,705	3,479	0,858	0,112827	0,639	0,221	2,41	0,1	0,657362
112	-5	72	4,6	6,417	3,501	0,516	0,067854	0,424	0,162	2,52	0,1	0,480229
113	-5	72	4,6	5,922	3,490	0,615	0,080873	0,531	0,183	2,15	0,1	0,531401
114	-5	72	4,6	5,76	3,489	0,615	0,080873	0,541	0,166	2,93	0,05	0,586509
115	-5	72	4,6	6,624	3,486	0,75	0,098625	0,580	0,160	2,67	0,05	0,775452
116	-5	72	4,6	4,905	3,490	0,516	0,067854	0,518	0,236	2,66	0,05	0,330649
117	-5	72	4,6	4,905	3,490	0,516	0,067854	0,518	0,236	2,61	0,05	0,330649
118	-5	72	4,6	6,624	3,486	0,75	0,098625	0,580	0,196	2,29	0,05	0,633745
119	-5	72	4,6	5,76	3,489	0,615	0,080873	0,541	0,215	2,81	0,05	0,452675
120	-5	72	4,6	5,922	3,490	0,615	0,080873	0,531	0,183	2,18	0,05	0,531401
121	-5	72	4,6	5,922	3,490	0,615	0,080873	0,531	0,183	2,32	0,05	0,531401
122	-5	72	4,6	5,76	3,489	0,615	0,080873	0,541	0,215	2,25	0,05	0,452675
123	-5	72	4,6	6,624	3,486	0,75	0,098625	0,580	0,160	3	0,05	0,775452
124	-5	72	4,6	4,905	3,490	0,516	0,067854	0,518	0,236	2,11	0,05	0,330649
125	-5	72	4,6	4,905	3,490	0,516	0,067854	0,518	0,236	2,42	0,05	0,330649
126	-5	72	4,6	6,624	3,486	0,75	0,098625	0,580	0,196	2,84	0,05	0,633745
127	-5	72	4,6	5,76	3,489	0,615	0,080873	0,541	0,166	2,58	0,05	0,586509
128	-5	72	4,6	5,922	3,490	0,615	0,080873	0,531	0,183	2,53	0	0,531401
201	-5	72	4,6	6,417	3,501	0,516	0,067854	0,424	0,162	2,54	0	0,331192
202	-5	72	4,6	6,705	3,479	0,858	0,112827	0,639	0,221	2,18	0,1	0,453353
203	-5	72	4,6	4,365	3,483	0,516	0,067854	0,562	0,225	2,35	0,1	0,238893
204	-5	72	4,6	4,365	3,483	0,516	0,067854	0,562	0,225	2,65	0,1	0,238893
205	-5	72	4,6	6,705	3,479	0,858	0,112827	0,639	0,221	2,28	0,1	0,453353
206	-5	72	4,6	6,417	3,501	0,516	0,067854	0,424	0,162	2,98	0,1	0,331192
207	-5	72	4,6	6,417	3,501	0,516	0,067854	0,424	0,162	2,57	0,1	0,331192
208	-5	72	4,6	6,705	3,479	0,858	0,112827	0,639	0,221	2,95	0,1	0,453353
209	-5	72	4,6	4,365	3,483	0,516	0,067854	0,562	0,225	2,57	0,1	0,238893

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
210	-5	72	4,6	4,365	3,483	0,516	0,067854	0,562	0,225	2,89	0,1	0,238893
211	-5	72	4,6	6,705	3,479	0,858	0,112827	0,639	0,221	2,33	0,1	0,453353
212	-5	72	4,6	6,417	3,501	0,516	0,067854	0,424	0,162	2,2	0,1	0,331192
213	-5	72	4,6	5,922	3,490	0,615	0,080873	0,531	0,183	2,42	0,1	0,366483
214	-5	72	4,6	5,76	3,489	0,615	0,080873	0,541	0,166	2,4	0,05	0,404489
215	-5	72	4,6	6,624	3,486	0,75	0,098625	0,580	0,160	2,29	0,05	0,534794
216	-5	72	4,6	4,905	3,490	0,516	0,067854	0,518	0,236	2,77	0,05	0,228034
217	-5	72	4,6	4,905	3,490	0,516	0,067854	0,518	0,236	2,62	0,05	0,228034
218	-5	72	4,6	6,624	3,486	0,75	0,098625	0,580	0,196	2,05	0,05	0,437065
219	-5	72	4,6	5,76	3,489	0,615	0,080873	0,541	0,215	2,58	0,05	0,312189
220	-5	72	4,6	5,922	3,490	0,615	0,080873	0,531	0,183	2,24	0,05	0,366483
221	-5	72	4,6	5,922	3,490	0,615	0,080873	0,531	0,183	2,71	0,05	0,366483
222	-5	72	4,6	5,76	3,489	0,615	0,080873	0,541	0,215	2,6	0,05	0,312189
223	-5	72	4,6	6,624	3,486	0,75	0,098625	0,580	0,160	2,73	0,05	0,534794
224	-5	72	4,6	4,905	3,490	0,516	0,067854	0,518	0,236	2,58	0,05	0,228034
225	-5	72	4,6	4,905	3,490	0,516	0,067854	0,518	0,236	2,08	0,05	0,228034
226	-5	72	4,6	6,624	3,486	0,75	0,098625	0,580	0,196	2,94	0,05	0,437065
227	-5	72	4,6	5,76	3,489	0,615	0,080873	0,541	0,166	2,14	0,05	0,404489
228	-5	72	4,6	5,922	3,490	0,615	0,080873	0,531	0,183	2,17	0	0,366483
301	-5	72	4,6	6,417	3,501	0,516	0,067854	0,424	0,162	2,54	0	0,331192
302	-5	72	4,6	6,705	3,479	0,858	0,112827	0,639	0,221	2,18	0,1	0,453353
303	-5	72	4,6	4,365	3,483	0,516	0,067854	0,562	0,225	2,35	0,1	0,238893
304	-5	72	4,6	4,365	3,483	0,516	0,067854	0,562	0,225	2,65	0,1	0,238893
305	-5	72	4,6	6,705	3,479	0,858	0,112827	0,639	0,221	2,28	0,1	0,453353
306	-5	72	4,6	6,417	3,501	0,516	0,067854	0,424	0,162	2,98	0,1	0,331192
307	-5	72	4,6	6,417	3,501	0,516	0,067854	0,424	0,162	2,57	0,1	0,331192
308	-5	72	4,6	6,705	3,479	0,858	0,112827	0,639	0,221	2,95	0,1	0,453353
309	-5	72	4,6	4,365	3,483	0,516	0,067854	0,562	0,225	2,57	0,1	0,238893
310	-5	72	4,6	4,365	3,483	0,516	0,067854	0,562	0,225	2,89	0,1	0,238893
311	-5	72	4,6	6,705	3,479	0,858	0,112827	0,639	0,221	2,33	0,1	0,453353
312	-5	72	4,6	6,417	3,501	0,516	0,067854	0,424	0,162	2,2	0,1	0,331192
313	-5	72	4,6	5,922	3,490	0,615	0,080873	0,531	0,183	2,42	0,1	0,366483
314	-5	72	4,6	5,76	3,489	0,615	0,080873	0,541	0,166	2,4	0,05	0,404489
315	-5	72	4,6	6,624	3,486	0,75	0,098625	0,580	0,160	2,29	0,05	0,534794
316	-5	72	4,6	4,905	3,490	0,516	0,067854	0,518	0,236	2,77	0,05	0,228034
317	-5	72	4,6	4,905	3,490	0,516	0,067854	0,518	0,236	2,62	0,05	0,228034
318	-5	72	4,6	6,624	3,486	0,75	0,098625	0,580	0,196	2,05	0,05	0,437065
319	-5	72	4,6	5,76	3,489	0,615	0,080873	0,541	0,215	2,58	0,05	0,312189
320	-5	72	4,6	5,922	3,490	0,615	0,080873	0,531	0,183	2,24	0,05	0,366483
321	-5	72	4,6	5,922	3,490	0,615	0,080873	0,531	0,183	2,71	0,05	0,366483
322	-5	72	4,6	5,76	3,489	0,615	0,080873	0,541	0,215	2,6	0,05	0,312189
323	-5	72	4,6	6,624	3,486	0,75	0,098625	0,580	0,160	2,73	0,05	0,534794
324	-5	72	4,6	4,905	3,490	0,516	0,067854	0,518	0,236	2,58	0,05	0,228034
325	-5	72	4,6	4,905	3,490	0,516	0,067854	0,518	0,236	2,08	0,05	0,228034
326	-5	72	4,6	6,624	3,486	0,75	0,098625	0,580	0,196	2,94	0,05	0,437065
327	-5	72	4,6	5,76	3,489	0,615	0,080873	0,541	0,166	2,14	0,05	0,404489

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
328	-5	72	4,6	5,922	3,490	0,615	0,080873	0,531	0,183	2,17	0	0,366483
401	-5	72	4,6	6,417	3,501	0,516	0,067854	0,424	0,162	2,54	0	0,331192
402	-5	72	4,6	6,705	3,479	0,858	0,112827	0,639	0,221	2,18	0,1	0,453353
403	-5	72	4,6	4,365	3,483	0,516	0,067854	0,562	0,225	2,35	0,1	0,238893
404	-5	72	4,6	4,365	3,483	0,516	0,067854	0,562	0,225	2,65	0,1	0,238893
405	-5	72	4,6	6,705	3,479	0,858	0,112827	0,639	0,221	2,28	0,1	0,453353
406	-5	72	4,6	6,417	3,501	0,516	0,067854	0,424	0,162	2,98	0,1	0,331192
407	-5	72	4,6	6,417	3,501	0,516	0,067854	0,424	0,162	2,57	0,1	0,331192
408	-5	72	4,6	6,705	3,479	0,858	0,112827	0,639	0,221	2,95	0,1	0,453353
409	-5	72	4,6	4,365	3,483	0,516	0,067854	0,562	0,225	2,57	0,1	0,238893
410	-5	72	4,6	4,365	3,483	0,516	0,067854	0,562	0,225	2,89	0,1	0,238893
411	-5	72	4,6	6,705	3,479	0,858	0,112827	0,639	0,221	2,33	0,1	0,453353
412	-5	72	4,6	6,417	3,501	0,516	0,067854	0,424	0,162	2,2	0,1	0,331192
413	-5	72	4,6	5,922	3,490	0,615	0,080873	0,531	0,183	2,42	0,1	0,366483
414	-5	72	4,6	5,76	3,489	0,615	0,080873	0,541	0,166	2,4	0,05	0,404489
415	-5	72	4,6	6,624	3,486	0,75	0,098625	0,580	0,160	2,29	0,05	0,534794
416	-5	72	4,6	4,905	3,490	0,516	0,067854	0,518	0,236	2,77	0,05	0,228034
417	-5	72	4,6	4,905	3,490	0,516	0,067854	0,518	0,236	2,62	0,05	0,228034
418	-5	72	4,6	6,624	3,486	0,75	0,098625	0,580	0,196	2,05	0,05	0,437065
419	-5	72	4,6	5,76	3,489	0,615	0,080873	0,541	0,215	2,58	0,05	0,312189
420	-5	72	4,6	5,922	3,490	0,615	0,080873	0,531	0,183	2,24	0,05	0,366483
421	-5	72	4,6	5,922	3,490	0,615	0,080873	0,531	0,183	2,71	0,05	0,366483
422	-5	72	4,6	5,76	3,489	0,615	0,080873	0,541	0,215	2,6	0,05	0,312189
423	-5	72	4,6	6,624	3,486	0,75	0,098625	0,580	0,160	2,73	0,05	0,534794
424	-5	72	4,6	4,905	3,490	0,516	0,067854	0,518	0,236	2,58	0,05	0,228034
425	-5	72	4,6	4,905	3,490	0,516	0,067854	0,518	0,236	2,08	0,05	0,228034
426	-5	72	4,6	6,624	3,486	0,75	0,098625	0,580	0,196	2,94	0,05	0,437065
427	-5	72	4,6	5,76	3,489	0,615	0,080873	0,541	0,166	2,14	0,05	0,404489
428	-5	72	4,6	5,922	3,490	0,615	0,080873	0,531	0,183	2,17	0	0,366483
501	-5	72	4,6	6,417	3,501	0,516	0,067854	0,424	0,162	2,54	0	0,331192
502	-5	72	4,6	6,705	3,479	0,858	0,112827	0,639	0,221	2,18	0,1	0,453353
503	-5	72	4,6	4,365	3,483	0,516	0,067854	0,562	0,225	2,35	0,1	0,238893
504	-5	72	4,6	4,365	3,483	0,516	0,067854	0,562	0,225	2,65	0,1	0,238893
505	-5	72	4,6	6,705	3,479	0,858	0,112827	0,639	0,221	2,28	0,1	0,453353
506	-5	72	4,6	6,417	3,501	0,516	0,067854	0,424	0,162	2,98	0,1	0,331192
507	-5	72	4,6	6,417	3,501	0,516	0,067854	0,424	0,162	2,57	0,1	0,331192
508	-5	72	4,6	6,705	3,479	0,858	0,112827	0,639	0,221	2,95	0,1	0,453353
509	-5	72	4,6	4,365	3,483	0,516	0,067854	0,562	0,225	2,57	0,1	0,238893
510	-5	72	4,6	4,365	3,483	0,516	0,067854	0,562	0,225	2,89	0,1	0,238893
511	-5	72	4,6	6,705	3,479	0,858	0,112827	0,639	0,221	2,33	0,1	0,453353
512	-5	72	4,6	6,417	3,501	0,516	0,067854	0,424	0,162	2,2	0,1	0,331192
513	-5	72	4,6	5,922	3,490	0,615	0,080873	0,531	0,183	2,42	0,1	0,366483
514	-5	72	4,6	5,76	3,489	0,615	0,080873	0,541	0,166	2,4	0,05	0,404489
515	-5	72	4,6	6,624	3,486	0,75	0,098625	0,580	0,160	2,29	0,05	0,534794
516	-5	72	4,6	4,905	3,490	0,516	0,067854	0,518	0,236	2,77	0,05	0,228034
517	-5	72	4,6	4,905	3,490	0,516	0,067854	0,518	0,236	2,62	0,05	0,228034

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
518	-5	72	4,6	6,624	3,486	0,75	0,098625	0,580	0,196	2,05	0,05	0,437065
519	-5	72	4,6	5,76	3,489	0,615	0,080873	0,541	0,215	2,58	0,05	0,312189
520	-5	72	4,6	5,922	3,490	0,615	0,080873	0,531	0,183	2,24	0,05	0,366483
521	-5	72	4,6	5,922	3,490	0,615	0,080873	0,531	0,183	2,71	0,05	0,366483
522	-5	72	4,6	5,76	3,489	0,615	0,080873	0,541	0,215	2,6	0,05	0,312189
523	-5	72	4,6	6,624	3,486	0,75	0,098625	0,580	0,160	2,73	0,05	0,534794
524	-5	72	4,6	4,905	3,490	0,516	0,067854	0,518	0,236	2,58	0,05	0,228034
525	-5	72	4,6	4,905	3,490	0,516	0,067854	0,518	0,236	2,08	0,05	0,228034
526	-5	72	4,6	6,624	3,486	0,75	0,098625	0,580	0,196	2,94	0,05	0,437065
527	-5	72	4,6	5,76	3,489	0,615	0,080873	0,541	0,166	2,14	0,05	0,404489
528	-5	72	4,6	5,922	3,490	0,615	0,080873	0,531	0,183	2,17	0	0,366483
601	-5	72	4,6	6,417	3,501	0,516	0,067854	0,424	0,162	2,54	0	0,331192
602	-5	72	4,6	6,705	3,479	0,858	0,112827	0,639	0,221	2,18	0,1	0,453353
603	-5	72	4,6	4,365	3,483	0,516	0,067854	0,562	0,225	2,35	0,1	0,238893
604	-5	72	4,6	4,365	3,483	0,516	0,067854	0,562	0,225	2,65	0,1	0,238893
605	-5	72	4,6	6,705	3,479	0,858	0,112827	0,639	0,221	2,28	0,1	0,453353
606	-5	72	4,6	6,417	3,501	0,516	0,067854	0,424	0,162	2,98	0,1	0,331192
607	-5	72	4,6	6,417	3,501	0,516	0,067854	0,424	0,162	2,57	0,1	0,331192
608	-5	72	4,6	6,705	3,479	0,858	0,112827	0,639	0,221	2,95	0,1	0,453353
609	-5	72	4,6	4,365	3,483	0,516	0,067854	0,562	0,225	2,57	0,1	0,238893
610	-5	72	4,6	4,365	3,483	0,516	0,067854	0,562	0,225	2,89	0,1	0,238893
611	-5	72	4,6	6,705	3,479	0,858	0,112827	0,639	0,221	2,33	0,1	0,453353
612	-5	72	4,6	6,417	3,501	0,516	0,067854	0,424	0,162	2,2	0,1	0,331192
613	-5	72	4,6	5,922	3,490	0,615	0,080873	0,531	0,183	2,42	0,1	0,366483
614	-5	72	4,6	5,76	3,489	0,615	0,080873	0,541	0,166	2,4	0,05	0,404489
615	-5	72	4,6	6,624	3,486	0,75	0,098625	0,580	0,160	2,29	0,05	0,534794
616	-5	72	4,6	4,905	3,490	0,516	0,067854	0,518	0,236	2,77	0,05	0,228034
617	-5	72	4,6	4,905	3,490	0,516	0,067854	0,518	0,236	2,62	0,05	0,228034
618	-5	72	4,6	6,624	3,486	0,75	0,098625	0,580	0,196	2,05	0,05	0,437065
619	-5	72	4,6	5,76	3,489	0,615	0,080873	0,541	0,215	2,58	0,05	0,312189
620	-5	72	4,6	5,922	3,490	0,615	0,080873	0,531	0,183	2,24	0,05	0,366483
621	-5	72	4,6	5,922	3,490	0,615	0,080873	0,531	0,183	2,71	0,05	0,366483
622	-5	72	4,6	5,76	3,489	0,615	0,080873	0,541	0,215	2,6	0,05	0,312189
623	-5	72	4,6	6,624	3,486	0,75	0,098625	0,580	0,160	2,73	0,05	0,534794
624	-5	72	4,6	4,905	3,490	0,516	0,067854	0,518	0,236	2,58	0,05	0,228034
625	-5	72	4,6	4,905	3,490	0,516	0,067854	0,518	0,236	2,08	0,05	0,228034
626	-5	72	4,6	6,624	3,486	0,75	0,098625	0,580	0,196	2,94	0,05	0,437065
627	-5	72	4,6	5,76	3,489	0,615	0,080873	0,541	0,166	2,14	0,05	0,404489
628	-5	72	4,6	5,922	3,490	0,615	0,080873	0,531	0,183	2,17	0	0,366483
701	-5	72	4,6	6,417	3,501	0,516	0,067854	0,424	0,162	2,54	0	0,331192
702	-5	72	4,6	6,705	3,479	0,858	0,112827	0,639	0,221	2,18	0,1	0,453353
703	-5	72	4,6	4,365	3,483	0,516	0,067854	0,562	0,225	2,35	0,1	0,238893
704	-5	72	4,6	4,365	3,483	0,516	0,067854	0,562	0,225	2,65	0,1	0,238893
705	-5	72	4,6	6,705	3,479	0,858	0,112827	0,639	0,221	2,28	0,1	0,453353
706	-5	72	4,6	6,417	3,501	0,516	0,067854	0,424	0,162	2,98	0,1	0,331192
707	-5	72	4,6	6,417	3,501	0,516	0,067854	0,424	0,162	2,57	0,1	0,331192

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
708	-5	72	4,6	6,705	3,479	0,858	0,112827	0,639	0,221	2,95	0,1	0,453353
709	-5	72	4,6	4,365	3,483	0,516	0,067854	0,562	0,225	2,57	0,1	0,238893
710	-5	72	4,6	4,365	3,483	0,516	0,067854	0,562	0,225	2,89	0,1	0,238893
711	-5	72	4,6	6,705	3,479	0,858	0,112827	0,639	0,221	2,33	0,1	0,453353
712	-5	72	4,6	6,417	3,501	0,516	0,067854	0,424	0,162	2,2	0,1	0,331192
713	-5	72	4,6	5,922	3,490	0,615	0,080873	0,531	0,183	2,42	0,1	0,366483
714	-5	72	4,6	5,76	3,489	0,615	0,080873	0,541	0,166	2,4	0,05	0,404489
715	-5	72	4,6	6,624	3,486	0,75	0,098625	0,580	0,160	2,29	0,05	0,534794
716	-5	72	4,6	4,905	3,490	0,516	0,067854	0,518	0,236	2,77	0,05	0,228034
717	-5	72	4,6	4,905	3,490	0,516	0,067854	0,518	0,236	2,62	0,05	0,228034
718	-5	72	4,6	6,624	3,486	0,75	0,098625	0,580	0,196	2,05	0,05	0,437065
719	-5	72	4,6	5,76	3,489	0,615	0,080873	0,541	0,215	2,58	0,05	0,312189
720	-5	72	4,6	5,922	3,490	0,615	0,080873	0,531	0,183	2,24	0,05	0,366483
721	-5	72	4,6	5,922	3,490	0,615	0,080873	0,531	0,183	2,71	0,05	0,366483
722	-5	72	4,6	5,76	3,489	0,615	0,080873	0,541	0,215	2,6	0,05	0,312189
723	-5	72	4,6	6,624	3,486	0,75	0,098625	0,580	0,160	2,73	0,05	0,534794
724	-5	72	4,6	4,905	3,490	0,516	0,067854	0,518	0,236	2,58	0,05	0,228034
725	-5	72	4,6	4,905	3,490	0,516	0,067854	0,518	0,236	2,08	0,05	0,228034
726	-5	72	4,6	6,624	3,486	0,75	0,098625	0,580	0,196	2,94	0,05	0,437065
727	-5	72	4,6	5,76	3,489	0,615	0,080873	0,541	0,166	2,14	0,05	0,404489
728	-5	72	4,6	5,922	3,490	0,615	0,080873	0,531	0,183	2,17	0	0,366483
801	-5	72	4,6	6,417	3,501	0,516	0,067854	0,424	0,162	2,54	0	0,331192
802	-5	72	4,6	6,705	3,479	0,858	0,112827	0,639	0,221	2,18	0,1	0,453353
803	-5	72	4,6	4,365	3,483	0,516	0,067854	0,562	0,225	2,35	0,1	0,238893
804	-5	72	4,6	4,365	3,483	0,516	0,067854	0,562	0,225	2,65	0,1	0,238893
805	-5	72	4,6	6,705	3,479	0,858	0,112827	0,639	0,221	2,28	0,1	0,453353
806	-5	72	4,6	6,417	3,501	0,516	0,067854	0,424	0,162	2,98	0,1	0,331192
807	-5	72	4,6	6,417	3,501	0,516	0,067854	0,424	0,162	2,57	0,1	0,331192
808	-5	72	4,6	6,705	3,479	0,858	0,112827	0,639	0,221	2,95	0,1	0,453353
809	-5	72	4,6	4,365	3,483	0,516	0,067854	0,562	0,225	2,57	0,1	0,238893
810	-5	72	4,6	4,365	3,483	0,516	0,067854	0,562	0,225	2,89	0,1	0,238893
811	-5	72	4,6	6,705	3,479	0,858	0,112827	0,639	0,221	2,33	0,1	0,453353
812	-5	72	4,6	6,417	3,501	0,516	0,067854	0,424	0,162	2,2	0,1	0,331192
813	-5	72	4,6	5,922	3,490	0,615	0,080873	0,531	0,183	2,42	0,1	0,366483
814	-5	72	4,6	5,76	3,489	0,615	0,080873	0,541	0,166	2,4	0,05	0,404489
815	-5	72	4,6	6,624	3,486	0,75	0,098625	0,580	0,160	2,29	0,05	0,534794
816	-5	72	4,6	4,905	3,490	0,516	0,067854	0,518	0,236	2,77	0,05	0,228034
817	-5	72	4,6	4,905	3,490	0,516	0,067854	0,518	0,236	2,62	0,05	0,228034
818	-5	72	4,6	6,624	3,486	0,75	0,098625	0,580	0,196	2,05	0,05	0,437065
819	-5	72	4,6	5,76	3,489	0,615	0,080873	0,541	0,215	2,58	0,05	0,312189
820	-5	72	4,6	5,922	3,490	0,615	0,080873	0,531	0,183	2,24	0,05	0,366483
821	-5	72	4,6	5,922	3,490	0,615	0,080873	0,531	0,183	2,71	0,05	0,366483
822	-5	72	4,6	5,76	3,489	0,615	0,080873	0,541	0,215	2,6	0,05	0,312189
823	-5	72	4,6	6,624	3,486	0,75	0,098625	0,580	0,160	2,73	0,05	0,534794
824	-5	72	4,6	4,905	3,490	0,516	0,067854	0,518	0,236	2,58	0,05	0,228034
825	-5	72	4,6	4,905	3,490	0,516	0,067854	0,518	0,236	2,08	0,05	0,228034

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
826	-5	72	4,6	6,624	3,486	0,75	0,098625	0,580	0,196	2,94	0,05	0,437065
827	-5	72	4,6	5,76	3,489	0,615	0,080873	0,541	0,166	2,14	0,05	0,404489
828	-5	72	4,6	5,922	3,490	0,615	0,080873	0,531	0,183	2,17	0	0,366483
901	-5	72	4,6	6,417	3,501	0,516	0,067854	0,424	0,162	2,63	0	0,480229
902	-5	72	4,6	6,705	3,479	0,858	0,112827	0,639	0,221	2,9	0,1	0,657362
903	-5	72	4,6	4,365	3,483	0,516	0,067854	0,562	0,225	2,14	0,1	0,346395
904	-5	72	4,6	4,365	3,483	0,516	0,067854	0,562	0,225	2,21	0,1	0,346395
905	-5	72	4,6	6,705	3,479	0,858	0,112827	0,639	0,221	2,66	0,1	0,657362
906	-5	72	4,6	6,417	3,501	0,516	0,067854	0,424	0,162	2,97	0,1	0,480229
907	-5	72	4,6	6,417	3,501	0,516	0,067854	0,424	0,162	2,34	0,1	0,480229
908	-5	72	4,6	6,705	3,479	0,858	0,112827	0,639	0,221	2,62	0,1	0,657362
909	-5	72	4,6	4,365	3,483	0,516	0,067854	0,562	0,225	2,28	0,1	0,346395
910	-5	72	4,6	4,365	3,483	0,516	0,067854	0,562	0,225	2,53	0,1	0,346395
911	-5	72	4,6	6,705	3,479	0,858	0,112827	0,639	0,221	2,06	0,1	0,657362
912	-5	72	4,6	6,417	3,501	0,516	0,067854	0,424	0,162	2,91	0,1	0,480229
913	-5	72	4,6	5,922	3,490	0,615	0,080873	0,531	0,183	2,09	0,1	0,531401
914	-5	72	4,6	5,76	3,489	0,615	0,080873	0,541	0,166	2,24	0,05	0,586509
915	-5	72	4,6	6,624	3,486	0,75	0,098625	0,580	0,160	2,57	0,05	0,775452
916	-5	72	4,6	4,905	3,490	0,516	0,067854	0,518	0,236	2,32	0,05	0,330649
917	-5	72	4,6	4,905	3,490	0,516	0,067854	0,518	0,236	2,89	0,05	0,330649
918	-5	72	4,6	6,624	3,486	0,75	0,098625	0,580	0,196	2,66	0,05	0,633745
919	-5	72	4,6	5,76	3,489	0,615	0,080873	0,541	0,215	2,78	0,05	0,452675
920	-5	72	4,6	5,922	3,490	0,615	0,080873	0,531	0,183	2,44	0,05	0,531401
921	-5	72	4,6	5,922	3,490	0,615	0,080873	0,531	0,183	2,27	0,05	0,531401
922	-5	72	4,6	5,76	3,489	0,615	0,080873	0,541	0,215	2,43	0,05	0,452675
923	-5	72	4,6	6,624	3,486	0,75	0,098625	0,580	0,160	2,86	0,05	0,775452
924	-5	72	4,6	4,905	3,490	0,516	0,067854	0,518	0,236	2,78	0,05	0,330649
925	-5	72	4,6	4,905	3,490	0,516	0,067854	0,518	0,236	2,76	0,05	0,330649
926	-5	72	4,6	6,624	3,486	0,75	0,098625	0,580	0,196	2,46	0,05	0,633745
927	-5	72	4,6	5,76	3,489	0,615	0,080873	0,541	0,166	2,63	0,05	0,586509
928	-5	72	4,6	5,922	3,490	0,615	0,080873	0,531	0,183	2,93	0	0,531401

Патент на полезную модель № 215740

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 215740**СОСТАВНАЯ ЯЧЕИСТОБЕТОННАЯ ПЕРЕМЫЧКА**

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова" (RU)*

Авторы: *Сулейманова Людмила Александровна (RU), Погорелова Инна Александровна (RU), Рябчевский Игорь Сергеевич (RU), Обайди Адхам Абдулсаттар Хамид (RU)*

Заявка № 2022130742

Приоритет полезной модели **25 ноября 2022 г.**Дата государственной регистрации
в Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации **23 декабря 2022 г.**Срок действия исключительного права
на полезную модель истекает **25 ноября 2032 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

Патент на полезную модель № 221280

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 221280

АРМИРОВАННАЯ ПЕРЕМЫЧКА ИЗ
ЯЧЕИСТОБЕТОННЫХ БЛОКОВ

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова" (RU)*

Авторы: *Сулейманова Людмила Александровна (RU), Погорелова Инна Александровна (RU), Рябчевский Игорь Сергеевич (RU), Обайди Адхам Абдулсаттар Хамид (RU)*

Заявка № 2023123080

Приоритет полезной модели 05 сентября 2023 г.

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации 30 октября 2023 г.Срок действия исключительного права
на полезную модель истекает 05 сентября 2033 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов



Патент на полезную модель № 222449

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 222449**АРМИРОВАННАЯ ПЕРЕМЫЧКА ИЗ
ЯЧЕИСТОБЕТОННЫХ БАЛОК**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова" (RU)*

Авторы: *Сулейманова Людмила Александровна (RU), Погорелова Инна Александровна (RU), Рябчевский Игорь Сергеевич (RU), Обайди Адхам Абдулсаттар Хамид (RU), Аноприенко Данила Сергеевич (RU)*

Заявка № **2023123079**Приоритет полезной модели **05 сентября 2023 г.**

Дата государственной регистрации

в Государственном реестре полезных

моделей Российской Федерации **26 декабря 2023 г.**

Срок действия исключительного права

на полезную модель истекает **05 сентября 2033 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов



**Свидетельство о государственной регистрации
Базы данных № 2023623566**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации базы данных

№ 2023623566

**База данных составных перемычек из ячеистобетонных
блоков с различным типом армирования**

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова» (RU)*

Авторы: *Сулейманова Людмила Александровна (RU),
Погорелова Инна Александровна (RU), Рябчевский Игорь
Сергеевич (RU), Богачева Марина Александровна (RU),
Обайди Адхам Абдулсаттар Хамид (IQ)*

Заявка № **2023623299**

Дата поступления **12 октября 2023 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре баз данных **19 октября 2023 г.**



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

**Свидетельство о государственной регистрации программы
для ЭВМ №2023681552**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023681552

**Программа расчета приведенного сопротивления
теплопередаче составных перемычек из
ячеистобетонных блоков**

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования «Белгородский
государственный технологический университет им. В.Г.
Шухова» (RU)*

Авторы: *Сулейманова Людмила Александровна (RU), Погорелова
Инна Александровна (RU), Рябчевский Игорь Сергеевич (RU),
Богачева Марина Александровна (RU), Обайди Адхам
Абдулсаттар Хамид (RU)*



Заявка № **2023680901**

Дата поступления **12 октября 2023 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **16 октября 2023 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Zubov

Программа расчета приведенного сопротивления теплопередаче составных перемычек из ячеистобетонных блоков

```

print('1. Перемычка из двух ячеистобетонных блоков ')
print('2. Перемычка из трех ячеистобетонных блоков ')
x = int(input('Введите номер типа перемычки  '))

print('1. Армирование стальной арматурой ')
print('2. Армирование стеклокомпозитной арматурой ')
print('3. Без стержневого армирования ')
y = int(input('Введите номер типа арматуры  '))

if y == 1 or y == 1.:
    LamdaA = 46
elif y == 2 or y == 2.:
    LamdaA = 0.35

print('1. Перемычка, армированная одним стержнем')
print('2. Перемычка, армированная двумя стержнями')
print('3. Перемычка, армированная лентой из углеродных волокон по шву')
print('4. Перемычка, армированная одним стержнем и лентой из углеродных
волокон по шву')
print('5. Перемычка, армированная двумя стержнями и лентой из углеродных
волокон по шву')
z = int(input('Введите номер типа армирования  '))
a = int(input('Введите длину блока, мм  '))
c = int(input('Введите высоту блока, мм  '))
b = int(input('Введите ширину блока, мм  '))
sh = int(input('Введите толщину вертикального шва, мм  '))
l = int(input('Введите ширину ленты из углеродных волокон, мм  '))
lamdaB = float(input('Введите коэффициент теплопроводности материала
блока, Вт/м^2·°C  '))
lamdaSh = float(input('Введите коэффициент теплопроводности материала
шва, Вт/м^2·°C  '))
lamdaL = float(input('Введите коэффициент теплопроводности материала
армирующей ленты, Вт/м^2·°C  '))
tv = float(input('Введите температуру воздуха со стороны внутренней
поверхности конструкции, °C  '))

```

tn = float(input('Введите температуру воздуха со стороны наружной поверхности конструкции, °C '))

QLj = float(input('Введите потери теплоты через стык j-го вида, Вт/м '))

if x == 1 or x == 1.:

if (c * 2 * a * sh) < 1:

k = 1 / (c * 2 * a * sh)

else:

k = 1

if z == 1 or z == 1.:

Ss = sh * c * k

Sa = 0.02 * (2 * a + sh)

Sl = 0

Sb = (2 * k * a * c) - Sa - Sl

Ll = 0

Ls = 2 * c * k

La = (2 * a) + sh

Rb = 1/8.7 + 1/23 + (b / 1000) / lamdaB

Ra = 1/8.7 + 1/23 + ((b - 20) / 1000) / lamdaB + 0.02 / LamdaA

Rs = 1/8.7 + 1/23 + (b / 1000) / lamdaSh

Rbl = 0

Rsl = 0

if z == 2 or z == 2.:

Ss = sh * c * k

Sa = 0.02 * (2 * a + sh)

Sl = 0

Sb = (2 * k * a * c) - Sa - Sl

Ll = 0

Ls = 2 * c * k

La = (2 * a) + sh

Rb = 1/8.7 + 1/23 + (b / 1000) / lamdaB

Ra = 1/8.7 + 1/23 + 3 * ((b - 40) / 1000) / lamdaB + 0.04 / LamdaA

Rs = 1/8.7 + 1/23 + (b / 1000) / lamdaSh

Rbl = 0

$$Rsl = 0$$

if z == 3 or z == 3.:

$$Ss = sh * c * k$$

$$Sa = 0$$

$$Sl = l * c * k$$

$$Sb = (2 * k * a * c) - Sa - Sl$$

$$Ll = 2 * c * k$$

$$Ls = 2 * c * k$$

$$La = 0$$

$$Rb = 1/8.7 + 1/23 + (b / 1000) / lamdaB$$

$$Ra = 0$$

$$Rs = 1/8.7 + 1/23 + (b / 1000) / lamdaSh$$

$$Rbl = 1/8.7 + 1/23 + (b / 1000) / lamdaB + 0.005 / lamdaL$$

$$Rsl = 1/8.7 + 1/23 + (b / 1000) / lamdaSh + 0.005 / lamdaL$$

if z == 4 or z == 4.:

$$Ss = sh * c * k$$

$$Sa = 0.02 * (2 * a + sh)$$

$$Sl = l * c * k$$

$$Sb = (2 * k * a * c) - Sa - Sl$$

$$Ll = 2 * c * k$$

$$Ls = 2 * c * k$$

$$La = (2 * a) + sh$$

$$Rb = 1/8.7 + 1/23 + (b / 1000) / lamdaB$$

$$Ra = 1/8.7 + 1/23 + ((b - 20) / 1000) / lamdaB + 0.02 / LamdaA$$

$$Rs = 1/8.7 + 1/23 + (b / 1000) / lamdaSh$$

$$Rbl = 1/8.7 + 1/23 + (b / 1000) / lamdaB + 0.005 / lamdaL$$

$$Rsl = 1/8.7 + 1/23 + (b / 1000) / lamdaSh + 0.005 / lamdaL$$

if z == 5 or z == 5.:

$$Ss = sh * c * k$$

$$Sa = 0.02 * (2 * a + sh)$$

$$Sl = l * c * k$$

$$Sb = (2 * k * a * c) - Sa - Sl$$

$$Ll = 2 * c * k$$

$$L_s = 2 * c * k$$

$$L_a = (2 * a) + sh$$

$$R_b = 1/8.7 + 1/23 + (b / 1000) / \lambda_B$$

$$R_a = 1/8.7 + 1/23 + 3 * ((b - 40) / 1000) / \lambda_B + 0.04 / \lambda_A$$

$$R_s = 1/8.7 + 1/23 + (b / 1000) / \lambda_{Sh}$$

$$R_{bl} = 1/8.7 + 1/23 + (b / 1000) / \lambda_B + 0.005 / \lambda_L$$

$$R_{sl} = 1/8.7 + 1/23 + (b / 1000) / \lambda_{Sh} + 0.005 / \lambda_L$$

elif x == 2 or x == 2.:

if (c * 6 * a * sh) < 1:

$$k = 1 / (c * 6 * a * sh)$$

else:

$$k = 1$$

if z == 1 or z == 1.:

$$S_s = 2 * sh * c * k$$

$$S_a = 0.02 * (3 * a + 2 * sh)$$

$$S_l = 0$$

$$S_b = (3 * k * a * c) - S_a - S_l$$

$$L_l = 0$$

$$L_s = 4 * c * k$$

$$L_a = (3 * a) + (2 * sh)$$

$$R_b = 1/8.7 + 1/23 + (b / 1000) / \lambda_B$$

$$R_a = 1/8.7 + 1/23 + ((b - 20) / 1000) / \lambda_B + 0.02 / \lambda_A$$

$$R_s = 1/8.7 + 1/23 + (b / 1000) / \lambda_{Sh}$$

$$R_{bl} = 0$$

$$R_{sl} = 0$$

if z == 2 or z == 2.:

$$S_s = 2 * sh * c * k$$

$$S_a = 0.02 * (3 * a + 2 * sh)$$

$$S_l = 0$$

$$S_b = (3 * k * a * c) - S_a - S_l$$

$$L_l = 0$$

$$L_s = 4 * c * k$$

$$La = (3 * a) + (2 * sh)$$

$$Rb = 1/8.7 + 1/23 + (b / 1000) / lamdaB$$

$$Ra = 1/8.7 + 1/23 + 3 * ((b - 40) / 1000) / lamdaB + 0.04 / LamdaA$$

$$Rs = 1/8.7 + 1/23 + (b / 1000) / lamdaSh$$

$$Rbl = 0$$

$$Rsl = 0$$

if z == 3 or z == 3.:

$$Ss = 2 * sh * c * k$$

$$Sa = 0$$

$$Sl = 2 * l * c * k$$

$$Sb = (3 * k * a * c) - Sa - Sl$$

$$Ll = 4 * c * k$$

$$Ls = 4 * c * k$$

$$La = 0$$

$$Rb = 1/8.7 + 1/23 + (b / 1000) / lamdaB$$

$$Ra = 0$$

$$Rs = 1/8.7 + 1/23 + (b / 1000) / lamdaSh$$

$$Rbl = 1/8.7 + 1/23 + (b / 1000) / lamdaB + 0.005 / lamdaL$$

$$Rsl = 1/8.7 + 1/23 + (b / 1000) / lamdaSh + 0.005 / lamdaL$$

if z == 4 or z == 4.:

$$Ss = 2 * sh * c * k$$

$$Sa = 0.02 * (3 * a + 2 * sh)$$

$$Sl = 2 * l * c * k$$

$$Sb = (3 * k * a * c) - Sa - Sl$$

$$Ll = 4 * c * k$$

$$Ls = 4 * c * k$$

$$La = (3 * a) + (2 * sh)$$

$$Rb = 1/8.7 + 1/23 + (b / 1000) / lamdaB$$

$$Ra = 1/8.7 + 1/23 + ((b - 20) / 1000) / lamdaB + 0.02 / LamdaA$$

$$Rs = 1/8.7 + 1/23 + (b / 1000) / lamdaSh$$

$$Rbl = 1/8.7 + 1/23 + (b / 1000) / lamdaB + 0.005 / lamdaL$$

$$Rsl = 1/8.7 + 1/23 + (b / 1000) / lamdaSh + 0.005 / lamdaL$$

if z == 5 or z == 5.:

$$S_s = 2 * sh * c * k$$

$$S_a = 0.02 * (3 * a + 2 * sh)$$

$$S_l = 2 * l * c * k$$

$$S_b = (3 * k * a * c) - S_a - S_l$$

$$L_l = 4 * c * k$$

$$L_s = 4 * c * k$$

$$L_a = (3 * a) + (2 * sh)$$

$$R_b = 1/8.7 + 1/23 + (b / 1000) / \lambda_B$$

$$R_a = 1/8.7 + 1/23 + 3 * ((b - 40) / 1000) / \lambda_B + 0.04 / \lambda_A$$

$$R_s = 1/8.7 + 1/23 + (b / 1000) / \lambda_{Sh}$$

$$R_{bl} = 1/8.7 + 1/23 + (b / 1000) / \lambda_B + 0.005 / \lambda_L$$

$$R_{sl} = 1/8.7 + 1/23 + (b / 1000) / \lambda_{Sh} + 0.005 / \lambda_L$$

площадь блоков и вертикальных швов в фрагменте

$$A_s = sh/10000$$

$$A_{bs} = 0.01 - A_s$$

$$Q_{s1} = (t_v - t_n) / R_b * A_{bs}$$

$$Q_{s2} = (t_v - t_n) / R_s * A_s$$

$$\Delta Q_s = Q_{Lj} - Q_{s1} - Q_{s2}$$

$$\Psi_s = \Delta Q_s / (t_v - t_n)$$

площадь блоков и ленты в фрагменте

$$A_l = 0.005$$

$$A_{bl} = 0.01 - A_l$$

if $R_{bl} == 0$:

$$\Psi_l = 0$$

else:

$$Q_{l1} = (t_v - t_n) / R_{bl} * A_{bl}$$

$$Q_{l2} = (t_v - t_n) / R_b * A_{bl}$$

$$\Delta Q_l = Q_{Lj} - Q_{l1} - Q_{l2}$$

$$\Psi_l = \Delta Q_l / (t_v - t_n)$$

площадь блоков и армирования в фрагменте

```

Aa = 0.002
Aba = 0.01-Aa

if Ra == 0:
    Psi_a = 0
else:
    Qa1 = (tv - tn)/ Ra * Aa
    Qa2 = (tv - tn)/ Rb * Aba
    DeltaQa = QLj - Qa1 - Qa2
    Psi_a = DeltaQa / (tv - tn)

if z == 1 or z == 1. or z == 2 or z == 2.:
    Rr = (1 / (Ss / Rs + Sb / Rb + Sa / Ra + Ls * Psi_s + La * Psi_a))
elif z == 3 or z == 3.:
    Rr = (1 / (Ss / Rs + Sb / Rb + Sl / Rbl + Ls * Psi_s + Ll * Psi_l))
elif z == 4 or z == 4. or z == 5 or z == 5.:
    Rr = (1 / (Ss / Rs + Sb / Rb + Sa / Ra + Sl / Rbl + Ls * Psi_s + La * Psi_a + Ll
* Psi_l))

qRb = round(Rb, 4)
qRs = round(Rs, 4)
qRa = round(Ra, 4)
qRbl = round(Rbl, 4)

Psi_sp = round(Psi_s, 5)
Psi_lp = round(Psi_l, 5)
Psi_ap = round(Psi_a, 5)

print('Площадь блоков =', Sb / 1000000, 'мм^2')
print('Площадь сквозных швов =', Ss / 1000000, 'мм^2')
print('Площадь участка стержневого армирования =', Sa / 1000000, 'мм^2')
print('Площадь участка армирования лентой =', Sl / 1000000, 'мм^2')

print('Сопротивление теплопередаче однородной части конструкции (блока)
= ', \
    qRb, '(м^2·°C)/Вт')
print('Сопротивление теплопередаче однородной части конструкции
(сквозного шва) = ', \

```

```

    qRs, '(м^2·°C)/Вт')
    print('Сопротивление теплопередаче однородной части конструкции (участка
стержневого армирования) = ', \
    qRa, '(м^2·°C)/Вт')
    print('Сопротивление теплопередаче однородной части конструкции (участка
армирования лентой) = ', \
    qRbl, '(м^2·°C)/Вт')
    print('Доп. удельные линейные потери теплоты через стыки блоков и швов =
', \
    Psi_sp + Psi_lp + Psi_ap, 'Вт/(м^2·°C)')
    print('Приведенное сопротивление теплопередаче конструкции = ', \
    Rr, '(м^2·°C)/Вт')

```

**Акт о внедрении результатов диссертационной работы предприятия
«Assad Babel For Building Technology»**

	شركة اسد بابل لتكنولوجيا البناء Assad Babel For Building Technology
No. : 65 Date : 18/02/2024	
ACT on the introduction of production of aerated concrete reinforced lintel for the degree of candidate of technical sciences Obaidi Adham Abdulsattar Hameed on the topic "Life cycle management of enclosing wall structures from aerated concrete blocks at the stages of design, construction and operation"	
The management of the Assad Babel factory for the production of light gas concrete blocks, panels and lintels, represented by Mr. Haider Ali Muhammad, confirms that the PhD student Adham Abdulsattar Hameed at Belgorod State Technical University and the supervision of Suleymanova Lyudmila Alexandrovna produced all composite samples of gas concrete blocks in Assad Babel factory for the production of gas concrete blocks. Light panels and lintels are located in the city of Babylon on the international highway, Iraq.	
The following materials and equipment were used during the work:	
- aerated concrete blocks with medium density grade D500 and strength class B3.5 from the Factory of the Assad Babel in the city of Babylon, Iraq; - carbon fiber tapes Sikawrap 230C; - A400 reinforcement (steel bars); - polyurethane glue.	
A head of factory	 A.M. Haider
Scientific supervisor	 L.A. Suleymanova
PhD student	 A.A.H. Obaidi
محافظة بابل - ناحية الامام - الطريق السريع الدولي - جسر رقم ١٤ تلفون : ٠٧٩٠١٩١٧٩٦٧ - ٠٧٧٠٢٦٩٠٧٠٢ - ٠٧٨٠١٠٠٢٢٤٠ الايمل : info@assadbabel.com - factoryasad@gmail.com الموقع الالكتروني : www.assadbabel.com	

Акт о внедрении результатов диссертационной работы предприятия «Factory for production lightweight blocks»


معمل أنتاج البلوك الخفيف
(الثرمستون)

Директор «Factory For Production lightweight Blocks»

Утверждаю
Рахим Суэйд Найл

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы
на соискание ученой степени кандидата технических наук
Обайди Адхам Абдулсаттар Хамид
на тему «Управление жизненным циклом ограждающих стеновых конструкций
из газобетонных блоков на этапах проектирования, возведения и эксплуатации»

« » 2023г.

г. Аль-Рамади

Комиссия в составе:

представителя «Factory For Production lightweight Blocks»

главный инженер Мизал Аль-Фахдави

представитель БГТУ им. В.Г.Шухова

доктор техн. наук, профессор Л.А.Сулейманова

аспирант А.А.Х. Обайди

составили настоящий акт о том, что по результатам диссертационной работы «Управление жизненным циклом ограждающих стеновых конструкций из газобетонных блоков на этапах проектирования, возведения и эксплуатации» была проведена установка составных перемычек из газобетонных блоков с внешним полосовым и стержневым армированием над оконными проемами в стенах из газобетонных блоков.

При производстве работ использовались следующие материалы и оборудование:

- газобетонные блоки с маркой по средней плотности D500 и классом по прочности B3,5 завода «Factory For Production lightweight Blocks» г. Аль- Рамади, Ирак;
- ленты из углеродных волокон Sikawrap 230C;
- арматура A400;
- полиуретановый клей.

Работы по установке составных перемычек из газобетонных блоков с внешним полосовым и стержневым армированием над оконными проемами в стенах из газобетонных блоков проводились при строительстве пятиэтажного жилого дома по ул. Аль-Джаранши в городе Аль-Рамади, мухафаза Анбар, Ирак.

Главный инженер

Проф., д-р техн. наук

Аспирант

Мизал Аль-Фахдави

Л.А.Сулейманова

А.А.Х. Обайди

Справка о внедрении результатов работы в учебный процесс

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по цифровой
трансформации и образовательной
деятельности
ВГТУ им. В.Г. Шухова
канд. техн. наук, доцент

В.М. Поляков

2024 г.



СПРАВКА

о внедрении результатов научно-исследовательской работы
в учебный процесс

Теоретические положения, результаты экспериментальных исследований и промышленной апробации, полученные при выполнении диссертационной работы А.А.Х. Обайди «Управление жизненным циклом объектов капитального строительства нейросетевым прогнозированием теплотерь здания», используются в учебном процессе при подготовке специалистов по направлению 08.03.01, 08.04.01 Строительство, что отражено в рабочих программах дисциплин «Современные технологии в строительстве», «Компьютерные технологии проектирования строительных конструкций», «Эффективные конструктивно-технологические решения зданий и сооружений»; по направлению 08.06.01 Техника и технологии строительства научной специальности «Управление жизненным циклом объектов строительства», что отражено в рабочих программах дисциплин «Теоретические основы этапов жизненного цикла объектов строительства», «Технологии информационного и математического моделирования в управлении жизненным циклом объектов строительства».

Директор Инженерно-строительного
института, д-р техн. наук, профессор

В.А. Уваров

Зам. заведующего кафедрой
строительства и городского хозяйства,
канд. техн. наук, доцент

С.М. Есипов