

На правах рукописи



ОБАЙДИ АДХАМ АБДУЛСАТТАР ХАМИД

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

2.1.14. Управление жизненным циклом объектов строительства

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

Белгород –2024

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

Научный руководитель доктор технических наук, профессор
Сулейманова Людмила Александровна

Официальные оппоненты **Опарина Людмила Анатольевна,**
доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Ивановский
государственный политехнический
университет», заведующий кафедрой
организации производства и городского
хозяйства

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

Ведущая организация ФГБОУ ВО «Донской государственный
технический университет»

Защита состоится «__» _____ 2024 года в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета 24.2.276.05, созданного на базе ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» по адресу: 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, ауд. 214 ГУК.

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

Автореферат разослан «__» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

С.М. Есипов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 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 теплопотерь 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 теплопотери 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, М. 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. Qi 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 теплопотерь 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 (Бакуба, 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 теплотерь.

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 теплотерь.

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Современное строительство сталкивается с вызовом обеспечения энергоэффективности и устойчивости зданий в условиях растущего внимания к экологической устойчивости и сокращению энергопотребления. Одним из ключевых аспектов достижения этих целей является эффективное управление жизненным циклом объектов капитального строительства на всех этапах. В этом контексте роль прогнозирования теплопотерь зданий и оптимизации конструктивных решений становится важной задачей.

Традиционные методы расчета и прогнозирования теплопотерь и оптимизации конструктивных решений часто ограничены в точности и универсальности. Они не всегда учитывают все факторы, влияющие на теплопередачу, такие как климатические условия, характеристики строительных материалов и технические параметры здания, а также не учитывают влияние данных факторов на результат прогноза и, соответственно, величину теплопотерь через ограждающие

конструкции.

В связи с этим, *рабочей гипотезой исследования* стало предположение о том, что эффективное управление жизненным циклом объектов капитального строительства возможно за счет оценки и прогнозирования теплопотерь в здании нейросетевым анализом формализованной по прямым и приведенным конструктивным и объемно-планировочным характеристикам модели, обеспечивающим оптимизацию конструктивных решений объекта, улучшающих его теплотехнические характеристики.

Для подтверждения рабочей гипотезы в части возможности прогнозировать потери теплоты через ограждающие конструкции из газобетонных блоков разработаны модели ИНС и МО.

В рамках данного исследования использовался набор обучающих данных, включающий прямые и приведенные конструктивные и объемно-планировочные характеристики, метеорологические сведения, теплотехнические характеристики материалов и изделий моделей 9 и 10-этажного жилых домов в г. Белгород (Россия) (Набор 1 и 2) и 7-этажного жилого дома в г. Аль-Рамади (Ирак) (Набор 3), таких как климатические показатели (температура (K1) и относительная влажность (K2) наружного воздуха и скорость ветра (K3)), конструктивные показатели здания (площадь стенового ограждения помещения (f1), приведенное сопротивление теплопередаче стеновой конструкции (f2), площадь перемычки (f3), дополнительные удельные линейные потери через стык перемычки и стены (f4), конструктивная плотность помещения (f5) и средняя высота этажа (f6)) и характеристики объемно-планировочного решения здания (коэффициент остекленности фасада (T1), световой коэффициент (T2), воздухопроницаемость помещения (T3), ориентация конструкции по сторонам света (T4) и потери теплоты через ограждающие конструкции (T5)).

Данный набор данных был разделен на два основных блока. Первый блок содержал 70 % от общего объема данных, полученных в ходе исследования, для обучения и настройки моделей ИНС и МО. Второй блок составлял 30 % от общего объема данных и использовался для тестирования эффективности работы моделей. Структура разработанной ИНС представлена на рис. 1.

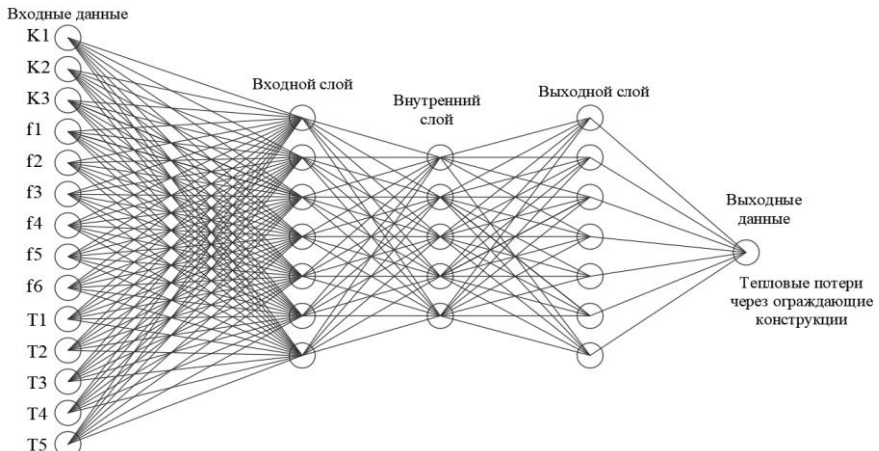


Рисунок 1 – Структура разработанной ИНС на примере 5 нейронов на внутреннем слое сети

Для создания моделей ИНС был осуществлен последовательный процесс обучения, охватывающий не менее 2000 эпох. Количество нейронов на внутреннем слое сети при обучении принимался от 5 до 30.

В ходе обучения из общего набора данных было отобрано 70% набора для использования в обучении. Оставшиеся 30% набора были зарезервированы для последующей проверки производительности моделей нейронных сетей. По результатам обучения было установлено, что наилучшая точность модели ИНС достигается при использовании 20 нейронов на внутреннем слое сети, при этом достигается наибольшая эффективность как на тренировочном, так и на тестовом наборе данных в диапазоне от 0,970 до 0,987.

Выбор правильных данных для обучения нейронных сетей подтверждается их корреляцией с фактическими значениями на графике прогнозирования временных рядов, представленных на рис. 2.

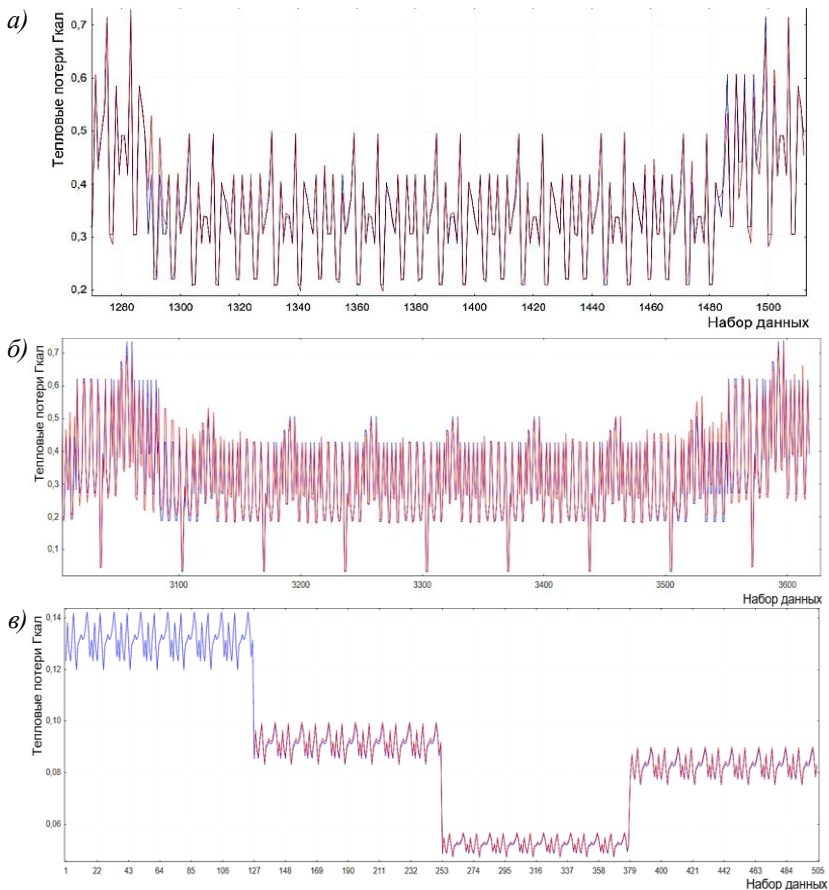


Рисунок 2 – График прогнозов временных рядов для сети с выборкой тренировки, теста и валидации на основе наборов данных: а – Набор 1; б – Набор 2; в – Набор 3;
— – фактические значения; — – прогнозные значения

Таким образом, результаты прогнозирования, полученные с использованием разработанных в данном исследовании моделей ИНС, можно считать практически достоверными, что свидетельствует о том, что модели успешно описывают зависимости в данных и могут быть использованы при выявлении, оценке и оптимизации технических решений здания, улучшающих тепловую защищенность на жизненном цикле объекта строительства.

Инструментом машинного обучения являлся алгоритм библиотеки `scikit-learn`. Обучение производилось с использованием оценщика «`RandomForestClassifier`». Для предварительной обработки данных перед их передачей в модель МО использовался препроцессор `StandardScaler`. Для оценки модели линейной регрессии выполнена пятикратная процедура перекрестной проверки с помощью метода `cross_validate`.

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.

График результатов предсказаний и исходных данных на основе обученной и оцененной модели для данных Набора 1 представлен на рис. 3.

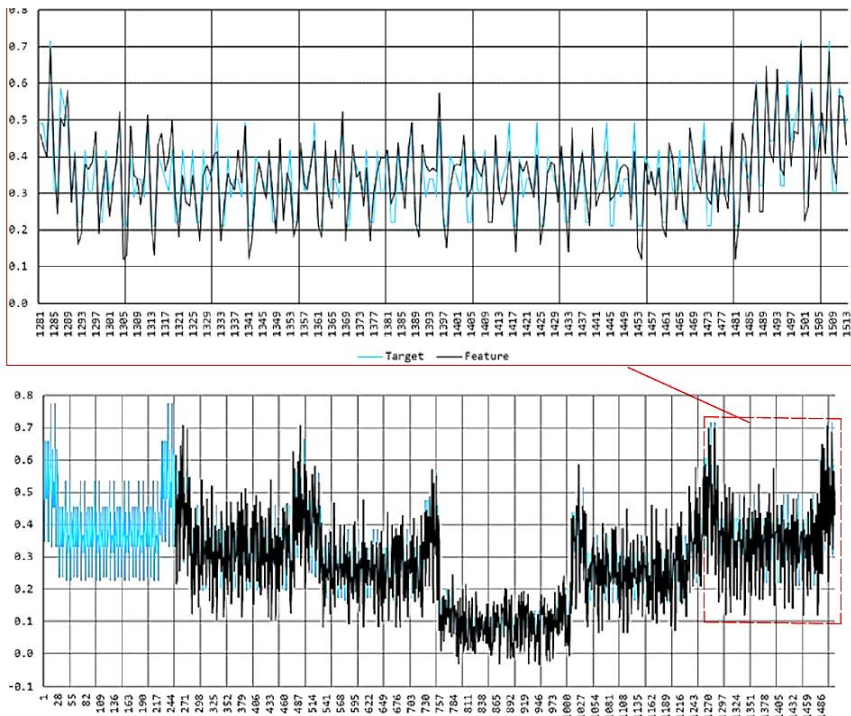


Рисунок 3 – График результатов прогнозов и исходных данных на основе обученной и оцененной модели для данных Набора 1: — фактические значения; — прогнозные значения

Результаты кросс-валидации подтверждают адекватность модели, демонстрируя высокую сходимость прогнозируемых и фактических значений на всех фолдах данных.

Для оценки эффективности моделей ИНС и МО проведено сравнение мер отклонений (средняя абсолютная ошибка (MAE), средняя абсолютная процентная ошибка (MAPE), квадратичное (Square Dev.) и стандартное (Standard Dev.) отклонения), представленное на рис. 4.

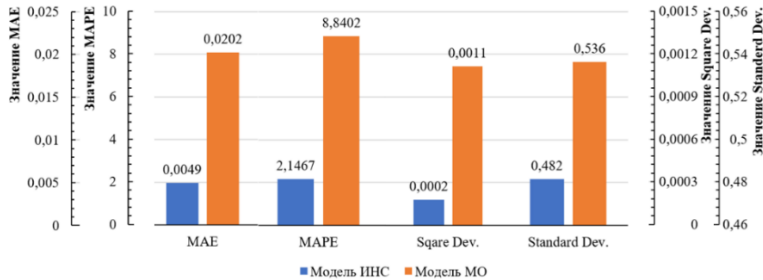


Рисунок 4 – Показатели отклонений модели

Таким образом, на основе проведенного анализа можно утверждать, что модель ИНС эффективнее модели МО для данных наборов данных.

Произведена оптимизации точности прогнозирования модели ИНС. В процессе исследования производится анализ чувствительности различных входных параметров на точность прогнозирования, который показал, что наиболее значимыми для качества прогноза тепловых потерь характеристиками модели здания являются температура наружного воздуха ($K1$), световой коэффициент ($T2$) и приведенное сопротивление теплопередаче стены без учета остекления ($f2$). Показатели чувствительности модели к ее характеристикам представлены на рис. 5, номограммы зависимостей тепловых потерь через ограждающие конструкции от данных переменных представлены на рис. 6.

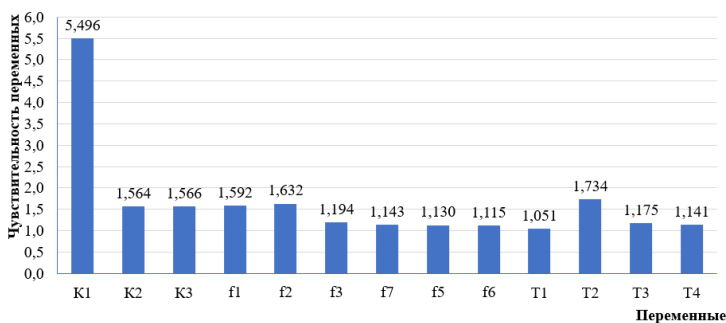


Рисунок 5 – Показатели чувствительности модели к ее характеристикам: $K1$ – температура наружного воздуха; $K2$ – относительная влажность наружного воздуха; $K3$ – скорость ветра; $f1$ – площадь стенового ограждения помещения; $f2$ – приведенное сопротивление теплопередаче стеновой конструкции; $f3$ – площадь перемычки; $f4$ – дополнительные удельные линейные потери через стык перемычки и стены; $f5$ – конструктивная плотность помещения; $f6$ – средняя высота этажа; $T1$ – коэффициент остекленности фасада; $T2$ – световой коэффициент; $T3$ – воздухопроницаемость помещения; $T4$ – ориентация конструкции

а)

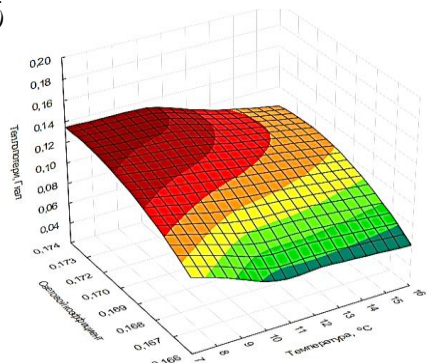
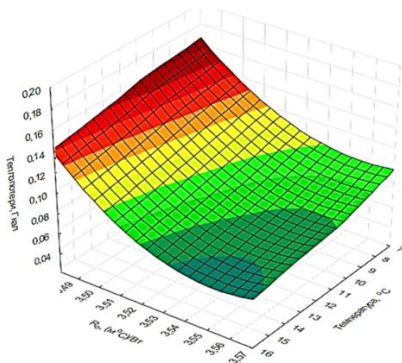


Рисунок 6 – Номограмма зависимости тепловых потерь: *а* – от температуры наружного воздуха и приведенного сопротивления теплопередаче через стеновое ограждение; *б* – от температуры наружного воздуха и светового коэффициента

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.

С целью обеспечения возможностей вариантного проектирования ограждающих конструкций по критерию минимизации тепловых потерь объекта на его жизненном цикле была проведена разработка, экспериментальное и численное конструктивное и энергетическое исследование вариантов технического решения элементов ограждения здания – составных газобетонных перемычек. Перемычка представляет собой конструкцию из газобетонных блоков, армированных лентами из углеродных волокон и стержневой арматурой. В рамках исследования было изготовлено 9 серий образцов с различным типом армирования, являющихся варьируемым техническим решением для рационализации проектирования ограждения здания.

Исследуемые альтернативные технические решения составных газобетонных перемычек включали газобетонные блоки с маркой по средней плотности $D500$ и классом по прочности $B3,5$. В качестве стержневого армирования применялись стальные стержни $A400$ диаметром 8-10 мм. Экспериментальные исследования механической обеспеченности технических решений перемычек осуществлялись на опытных образцах размером $200 \times 240 \times 1200$ мм, расчетным пролетом 1100 мм.

В результате экспериментальных исследований установлено, что для образцов 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.

Результаты распределения относительных деформаций углеродного волокна по длине анкеровки на образцах свидетельствует о затухающем характере распределения деформаций элемента армирования по длине образца. Изменение на образце в интервале 300-600 мм линейно в соответствии с линейным уменьшением изгибающего момента в сечениях.

Результаты численного эксперимента при жестком сцеплении композита с

газобетоном показали максимальное завышение величин несущей способности и жесткости образцов; при фрикционном соединении композита с газобетоном показали несколько меньшее завышение величин несущей способности и жесткости образцов.

На основании данных, полученных в ходе экспериментальных и численных исследований, выявлено, что данное техническое решение справедливо в диапазоне пролетов от 1,2 до 2,5 м. Пролеты от 1,2 до 1,8 м определены экспериментально, пролеты от 1,8 до 2,5 м смоделированы на основе конечно-элементной модели. Данное техническое решение обеспечивает возможность вариантного проектирования при управлении жизненным циклом объектов строительства.

Для определения теплозащитных свойств альтернативных технических решений произведен расчет приведенного сопротивления теплопередаче участков стеновой конструкции из газобетонных блоков с различным перекрытием оконного проема с учетом линейных и точечных теплотехнических однородностей (рис. 7). Для расчета рассматриваются фрагмент стены с перемычкой различного типа.

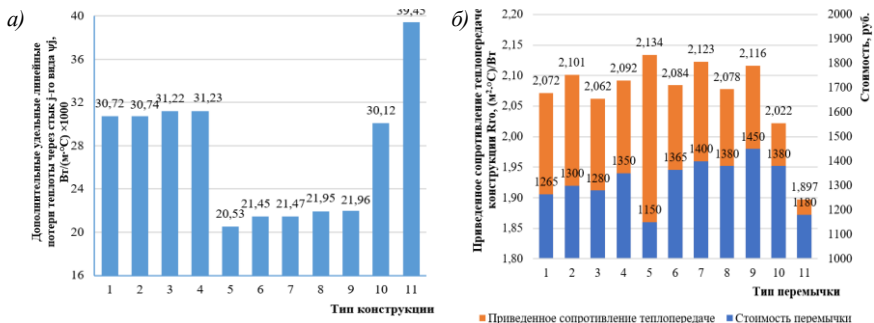


Рисунок 7 – Результаты исследования теплозащитных характеристик вариантов технических решений ограждающей конструкции здания: *а* – дополнительные удельные линейные потери теплоты через стык *j*-го вида; *б* – приведенное сопротивление теплопередаче фрагментов стен со стоимостью перемычки; 1 – стена 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

Установлено, что при равной механической обеспеченности вариантов перемычек армирование стальными стержнями снижает их термическое сопротивление на 3-6% по сравнению со стержневым армированием стеклокомпозитной арматурой в связи с высокой теплопроводностью стали (рис. 7, *а*). Наиболее теплоэффективным типом армирования перемычек является внешнее полосовое армирование, поскольку показатели приведенного сопротивления теплопередаче на 8-11% выше показателей прочих вариантов перемычек.

Экономическая эффективность энергетически оптимального технического решения в 20-25% (рис. 7, *б*) также обусловлена меньшей трудоемкостью монтажа

за счет отсутствия необходимости дополнительной обработки блоков в виде штраб и укладки в них арматуры.

Для численного исследования теплового баланса ограждения здания с использованием вариантов технического решения перемычек разработана конечно-элементная модель участка стены в кладке из газобетона размерами $3,5 \times 2,6 \times 0,3$ м с геометрически нанесенными техническими решениями перемычек (составная перемычка с внешним полосовым армированием и перемычка из U-образных блоков, состоящими из арматурного каркаса и заливки бетоном) для городов Аль-Рамади (Ирак) и Белгорода (Россия), что представлено на рис. 8.

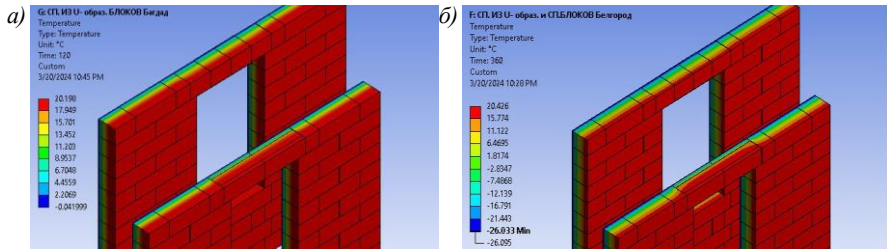


Рисунок 8 – Модели температурного состояния стены с составной перемычкой, армированной лентами из углеродных волокон и с составной перемычкой из U-образных блоков: а – для г. Багдад; б – для г. Белгород

Результаты численного эксперимента показывают, что технические решения ограждения в виде составной перемычки из газобетонных блоков, усиленной внешним полосовым армированием, обеспечивают наибольшую тепловую защиту здания при вариантном проектировании технических решений его ограждения.

Произведено ранжирование альтернативных технических решений по степени эффективности их использования в ограждающих конструкциях по физико-механическим и экономическим показателям. По совокупности факторов установлена последовательность повышения эффективности использования альтернативных технических решений в управлении жизненным циклом здания на этапах, включающих создание, обновление и реконструкцию его стенового ограждения: с одним стержнем → с двумя стержнями → армированная сплошная перемычка → составная перемычка из U-образных блоков → с лентами из углеродных волокон → с одним стержнем и лентами из углеродных волокон → с двумя стержнями и лентами из углеродных волокон. Для дальнейшего апробационного нейросетевого прогнозирования тепловых потерь здания и сравнительной оценки эффективности использования в конструкциях ограждения были приняты перемычка с двумя стеклокомпозитными стержнями и лентами из углеродных волокон и перемычка с двумя стальными стержнями и лентами из углеродных волокон.

В качестве исходных данных были приняты расчетные эксплуатационные характеристики проектируемого здания из газобетонных блоков в г. Аль-Рамади (Ирак) с принятыми вариантами перекрытия оконных проемов.

График прогнозируемых теплопотерь здания при использовании альтернативных технических решений ограждения представлен на примере

наиболее теплоэффективной стены с перемычкой с двумя стеклокомпозитными стержнями и лентами из углеродных волокон, что показано на рис. 9.

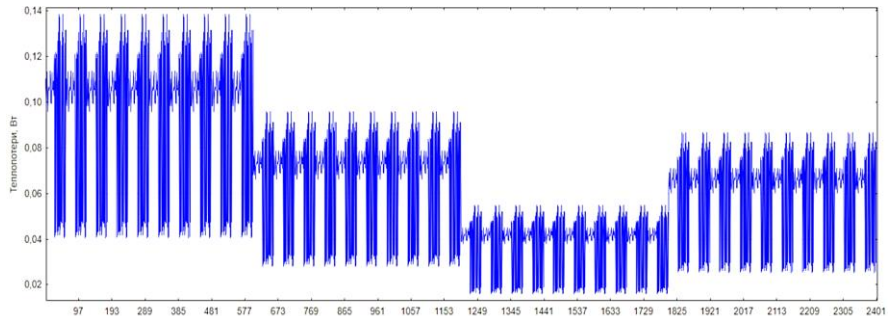


Рисунок 9 – График распределения прогнозируемых теплотерь за отопительный сезон для здания в г. Аль-Рамади (Ирак) с принятым вариантом технического решения ограждения с перемычкой с двумя стеклокомпозитными стержнями и лентами из углеродных волокон по шву

По результатам нейросетевого прогнозирования теплотерь на формализованной по прямым и приведенным конструктивным и объемно-планировочным характеристикам модели исследуемого здания можно ранжировать альтернативные технические решения по степени эффективности тепловой защиты здания: перемычка с двумя стеклокомпозитными стержнями и лентами из углеродных волокон по шву демонстрирует наименьшие прогнозируемые теплотери. Перемычка из U-образных блоков показывает наибольшие прогнозируемые теплотери по сравнению с другими типами перемычек, а использование стеклокомпозитных стержней может быть наиболее предпочтительным для рационального проектирования ограждения на этапах жизненного цикла объекта строительства.

Эффективность капитальных вложений (табл. 1) в реализованные технические решения ограждения здания (перемычка с двумя стеклокомпозитными (тип 2) либо стальными (тип 3) стержнями и лентами из углеродных волокон по шву) по отношению к базовому варианту (тип 1) за отопительный сезон определена отношением стоимости сэкономленных теплотерь к разнице прямых затрат на устройство элементов ограждения по вариантам. Результаты расчета 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 теплотерь здания перспективе 1,3-1,8 года.

Таблица 1 – Экономическая эффективность внедрения алгоритма прогнозирования тепловых потерь через ограждающие конструкции

Тип перемычки	Количество перемычек, шт.	Прямые затраты, руб.	Прогнозируемые теплотери, 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	$(1335056 - 186272) / (1841322 - 1574471) = 56\%$

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 (рис. 10).

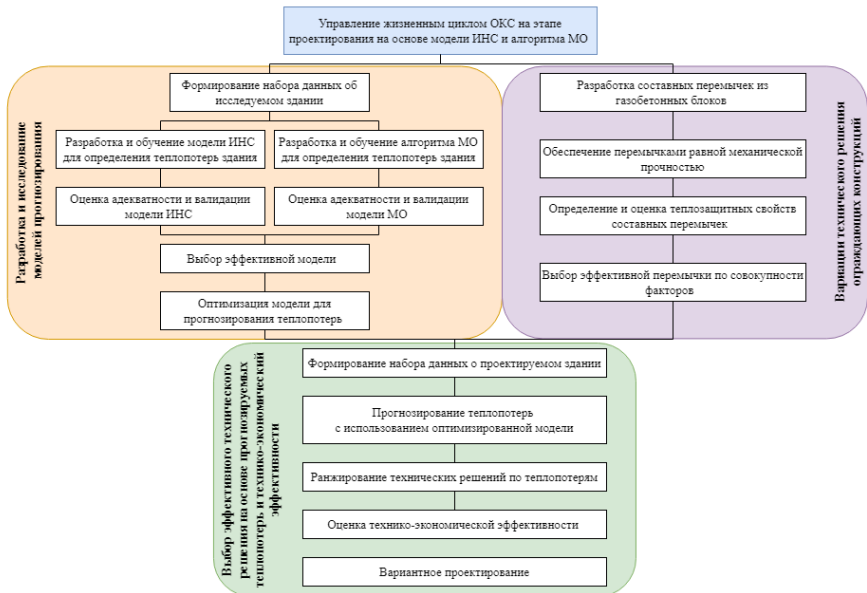


Рисунок 10 – Дизайн-схема управления жизненным циклом объектов капитального строительства нейросетевым прогнозированием теплотерь здания

В результате проведенных исследований предложены научно-теоретические основы, представлены ключевые алгоритмы и проведена экспериментальная апробация, подтверждающая целесообразность использования в практике управления зданием при его строительстве, обновлении и реконструкции, а также технологии анализа, ранжирования и количественной оценки эффективности вариантно проектируемых технических решений ограждающих конструкций, обеспечивающие рациональное управление жизненным циклом объекта строительства по показателю минимизации прогнозируемых тепловых потерь 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 корреляционных 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 НАУЧНЫХ ТРУДОВ, В КОТОРЫХ ИЗЛОЖЕНЫ ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАБОТЫ

***В журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий,
рекомендованных ВАК РФ***

1. Сулейманова, Л.А. Управление жизненным циклом здания на этапе эксплуатации с использованием моделей искусственных нейронных сетей и

машинного обучения / Л.А. Сулейманова, **А.А. Обайди** // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2024. – №. 3. – С. 38-46. (K1)

2. Сулейманова, Л.А. Прогнозирование тепловых потерь на стадии эксплуатации при управлении жизненным циклом объекта капитального строительства с использованием искусственных нейронных сетей / Л.А. Сулейманова, **А.А.Х. Обайди** // Components of scientific and technological progress. – 2023. – № 12(90). – С. 111-117. (K3)

3. **Обайди, А.А.Х.** Исследование прочностных свойств составных газобетонных перемычек с внешним композитным армированием / А.А.Х. Обайди // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. – 2023. – № 27. – С. 19-31. (K3)

4. Сулейманова, Л.А. Исследование напряженно-деформированного состояния перемычек газобетонных составных / Л.А. Сулейманова, **А.А. Обайди**, П.А. Амелин, Т.Х. Мохаммедали // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2023. – № 12. – С. 32-40. (K1)

5. 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>. (K2)

В изданиях, индексируемых в базах данных Scopus

6. Suleymanova, L.A. Study of the thermal protection characteristics of composite aerated concrete lintels when optimizing the life cycle of a building / L.A. Suleymanova, **A.A. Hameed** // 19th International Conference Water and Wastewater: Transportation, Treatment, Management “Yakovlev Readings” (YRC-2024). 2024. Vol. 107. P. 8.

7. Hasan B.N. A Parametric Study on Behavior of Elliptical Cantilever Deep Beams / B.N. Hasan, K.S. Abdul-Razzaq, **A.A. Hameed** // Diyala Journal of Engineering Sciences. 2022. Vol (15). No 4. P. 27-43.

8. Suleymanova, L.A. Study of the Strength of Flexural Elements Made of Cellular Concrete / L.A. Suleymanova, P.A. Amelin, **A.A. Hameed** // Digital Technologies in Construction Engineering. Lecture Notes in Civil Engineering. 2022. Vol. 173. P. 107-114. (Q4)

В сборниках конференций

9. **Обайди А.А.Х.** Использование искусственных нейронных сетей на стадии эксплуатации при управлении жизненным циклом объекта капитального строительства / А.А.Х. Обайди // В сборнике: VIII Всероссийская научно-практическая конференция «Инженерное дело на Дальнем Востоке России». – Владивосток: Изд-во Военного учебного центра ДВФУ. – 2023. – С. 277-282.

10. **Обайди, А.А.Х.** Применение искусственных нейронных сетей при управлении жизненным циклом объектов строительства / А.А.Х. Обайди // В сборнике: VIII Международный студенческий строительный форум – 2023. – Белгород. – 2023. Т. 2. – С. 297-302.

11. Сулейманова, Л.А. Исследование физико-механических характеристик

автоклавного газобетона с применением микрокремнезема и полипропиленовых волокон / Л.А. Сулейманова, **А.А.Х. Обайди** // В сборнике докладов Международной научно-практической конференции «Наукоемкие технологии и инновации» (XXV научные чтения), посвященной 170-летию со дня рождения В.Г. Шухова. – Белгород. 2023. – С. 214-218.

12. **Обайди, А.А.Х.** Композитное усиление железобетонных конструкций в растянутой зоне бетона / А.А.Х. Обайди, Д.С. Аноприенко // В сборнике: XV Международный молодежный форум «Образование. Наука. Производство». – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2023. – Ч. 6. – С. 78-81.

13. Сулейманова, Л.А. Прогнозирование энергопотребления здания на основе нейронных сетей / Л.А. Сулейманова, **А.А. Обайди** // Университетская наука. – 2023. – № 2(16). – С. 65-67.

14. Сулейманова, Л.А. Исследование структурных характеристик изделий из автоклавного газобетона / Л.А. Сулейманова, **А.А. Обайди**, К.А. Лосевская // В сборнике: V Международная научно-практическая конференция «Наука и инновации в строительстве»: сб. докл. – Белгород. 2021. Т. 1. – С. 144-149.

15. **Обайди, А.А.Х.** Применение перемычек из газобетона автоклавного твердения / А.А.Х. Обайди, К.А. Лосевская, Р.Н. Темурзиева // В сборнике: Молодежь и научно-технический прогресс. Сборник докладов XIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 2-х томах. Старый Оскол. – 2020. – С. 293–296.

16. Suleymanova, L. The role of shear span to effective depth ratio (a/d) on the deflection in deep and normal reinforced concrete beams when this ratio is (1, 2, 3, and 4) / L. Suleymanova, V. Rimshin, A. Ibrahim, **A.A. Hameed**, D. Obemikhin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. No 890(1). P. 012044.

17. Ismael, M.A. Effect of Coarse Aggregate Size on Shear Behavior of Self Compacting Concrete and Conventional Concrete Beams / M.A. Ismael, H.J. Abd, **A.A. Hameed** // International Journal of Engineering & Technology. 2018. No 7. P. 359-363.

Объекты интеллектуальной собственности

18. **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.

19. **Свидетельство о государственной регистрации Базы данных № 2023623566.** База данных составных перемычек из ячеистобетонных блоков с различным типом армирования // 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».

Опубл. 19.10.23.

20. Пат. на полезную модель RU 221280. Армированная перемычка из ячеистобетонных блоков // Л.А. Сулейманова, И.А. Погорелова, И.С. Рябчевский, **А.А.Х. Обайди**. Правообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова». Опубл. 30.10.23.

21. Пат. на полезную модель RU 222449. Армированная перемычка из ячеистобетонных балок // Л.А. Сулейманова, И.А. Погорелова, И.С. Рябчевский, **А.А.Х. Обайди**, Д.С. Аноприенко. Правообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова». Опубл. 26.12.23.

22. Пат. на полезную модель RU 215740. Составная ячеистобетонная перемычка // Л.А. Сулейманова, И.А. Погорелова, И.С. Рябчевский, **А.А.Х. Обайди**. Правообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова». Опубл. 23.12.22.

ОБАЙДИ АДХАМ АБДУЛСАТТАР ХАМИД

УПРАВЛЕНИЕ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ОБЪЕКТОВ КАПИТАЛЬНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА НЕЙРОСЕТЕВЫМ ПРОГНОЗИРОВАНИЕМ ТЕПЛОПOTЕРЬ ЗДАНИЯ

2.1.14. Управление жизненным циклом объектов строительства

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 03.07.2024. Формат 60×84/16.

Усл. печ. л. 1,22. Тираж 100 экз. Заказ __.

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