 На правах рукописи

МАЛЫГИНА ОКСАНА АЛЕКСАНДРОВНА

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ОТОПЛЕНИЯ
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕМ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ**

2.1.3. Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха,
газоснабжение и освещение

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Луганск – 2025

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля», г. Луганск.

Научный руководитель:	Пилавов Манолис Васильевич доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля», профессор кафедры вентиляции, теплогазо- и водоснабжения
Официальные оппоненты:	Ерёмкин Александр Иванович доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства», заведующий кафедрой теплогазоснабжения и вентиляции Долгов Николай Викторович, кандидат технических наук, доцент, ДОННАСА – филиал ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет». доцент кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции
Ведущая организация:	ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»

Защита состоится «__» _____ 2025 года в 10-00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.486.02 при ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля» по адресу: 291001, Луганская Народная Республика, г.о. город Луганск, г. Луганск, ул. Октябрьская, 4, корп. 16, аудитория № 108, тел: +7(959) 150-76-80, e-mail: sovet24.2.486.02@yandex.ru.

С диссертацией можно ознакомиться: в научной библиотеке ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля» по адресу: 291034, Луганская Народная Республика, г.о. город Луганск, г. Луганск, кв. Молодежный, 20А, корп. 11, тел: +7(959) 138-34-80.

Автореферат разослан «__» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Засько Виталий Васильевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Одним из основных направлений повышения эффективности систем отопления жилых зданий массовой застройки является использование теплоизоляционных материалов в ограждающих конструкциях. В настоящее время на рынке утеплителей представлен целый ряд отечественных теплоизоляционных материалов, среди которых наиболее распространенными являются IZOVOL, ТЕХНОФАС ПРОФ, ПЕНОПЛЕКС КОМФОРТ. Несмотря на их широкое применение, в полной мере не изучено влияние изменения влажности в процессе эксплуатации на теплофизические свойства данных материалов, что не позволяет достоверно прогнозировать тепловые потери систем отопления и оценивать приведенные затраты на их функционирование в отопительный период.

Учет изменения теплофизических свойств теплоизоляционных материалов в процессе эксплуатации требует совершенствование методов определения теплотехнических характеристик ограждающих конструкций, что, в свою очередь, связано с разработкой соответствующих математических моделей теплооблагоденоса и проведение экспериментальных исследований по определению зависимостей коэффициентов теплопроводности и влагоденности утеплителей от сорбционной влажности. Важным является развитие методик и программных средств для имитационного моделирования теплооблагоденности процессов в многослойных ограждающих конструкциях жилых зданий массовой застройки. Повышение точности оценки энергоэффективности и экономической целесообразности применения типовых теплоизоляционных материалов в ограждающих конструкциях даст возможность разработать практические рекомендации по повышению эффективности систем отопления.

На основании вышеизложенного повышение эффективности систем отопления зданий совершенствованием методов определения теплотехнических характеристик ограждающих конструкций является актуальной научно-практической задачей, решение которой позволит обеспечить повышение точности прогнозирования тепловых потерь и снижение приведенных затрат.

Степень разработанности темы исследования.

По тематике диссертационной работы проведены многочисленные исследования отечественными и зарубежными учеными по изучению теплотехнических характеристик ограждающих конструкций и моделированию процессов теплооблагоденоса в них.

Наиболее значимый вклад в развитие методов определения теплотехнических характеристик внесли такие учёные, как: Андрийчук Н.Д., Богословский В.Н., Гагарин В.Г., Ерёмкин А.И., Козлов В.В., Куприянов В.Н., Корниенко С.В., Лукьянов В.И., Лыков А.В., Мачинский В.Д., Перехоженцев А.Г., Самарин О.Д., Тертичник Е.И., Ушков Ф.В., Фокин К.Ф., Франчук А.У., Künzel H.M., Phillip J.R., Pel L. и др.

Объект исследования – системы отопления зданий, теплоизоляционные материалы и наружные ограждающие конструкции.

Предмет исследования – теплотехнические характеристики теплоизоляционных материалов и ограждающих конструкций, показатели эффективности систем отопления.

Цель исследования – повышение эффективности систем отопления совершенствованием методов определения теплотехнических характеристик ограждающих конструкций, что обеспечивает повышение точности прогнозирования тепловых потерь и снижение приведенных затрат.

Задачи исследования:

- выполнить анализ современных методов определения теплотехнических характеристик теплоизоляционных материалов и ограждающих конструкций, обосновать основные направления исследований для повышения эффективности систем отопления зданий;

- предложить математическую модель тепловлагоденоса в четырехслойной ограждающей конструкции для расчета тепловых потерь систем отопления с учетом изменения влажности в процессе эксплуатации;

- выполнить экспериментальные исследования коэффициентов теплопроводности и влагоденности типовых теплоизоляционных материалов в зависимости от сорбционной влажности для повышения точности определения теплотехнических характеристик ограждающих конструкций;

- разработать методику моделирования теплотехнических характеристик четырехслойной ограждающей конструкции с учетом изменения влажности в процессе эксплуатации для прогнозирования тепловых потерь систем отопления;

- выполнить исследования теплотехнических характеристик и тепловых потерь четырехслойной ограждающей конструкции с различными теплоизоляционными материалами;

- выполнить анализ энергоэффективности и экономической целесообразности применения типовых теплоизоляционных материалов для жилых зданий массовой застройки на примере г. Луганска, разработать рекомендации по повышению эффективности систем отопления.

Методы исследования.

Достижение поставленной цели и выполнение сформулированных задач диссертационной работы проведено на основе системного подхода к теоретическим и экспериментальным исследованиям. В основе теоретических исследований лежат классические уравнения теплопроводности, конвективного теплообмена, влагоденности и диффузии водяного пара. При разработке математической модели расчета тепловлагоденоса в ограждающих конструкциях использованы методы компьютерного имитационного моделирования. Экспериментальные исследования на лабораторном стенде выполнены согласно стандартным и специальным методикам с использованием аттестованных средств измерительной техники и испытательного оборудования. Применены методы статистической обработки экспериментальных данных.

Научная новизна.

1. Разработана математическая модель тепловлагоденоса в четырехслойной ограждающей конструкции с учетом изменения влажности в процессе эксплуатации, обеспечивающая повышение точности прогнозирования тепловых потерь систем отопления.

2. На основе экспериментальных исследований получены аналитические выражения для коэффициентов теплопроводности и влагоденности типовых теплоизоляционных материалов в зависимости от сорбционной влажности, что позволило усовершенствовать методы определения теплотехнических характеристик ограждающих конструкций.

3. Предложена методика моделирования теплотехнических характеристик четырехслойной ограждающей конструкции с учетом изменения влажности в процессе эксплуатации, позволяющая анализировать энергоэффективность и экономическую целесообразность применения теплоизоляционных материалов.

Практическая значимость работы.

1. Разработана имитационная модель теплотехнических характеристик четырехслойной ограждающей конструкции в пакете программ COMSOL Multiphysics 6.2 для прогнозирования тепловых потерь систем отопления.

2. Проведены исследования теплотехнических характеристик и тепловых потерь четырехслойной ограждающей конструкции для типовых теплоизоляционных материалов IZOVOL, ТЕХНОФАС ПРОФ, ПЕНОПЛЕКС КОМФОРТ на примере жилых зданий массовой застройки г. Луганска.

3. Выполнен анализ энергоэффективности и экономической целесообразности применения типовых теплоизоляционных материалов для жилых зданий массовой застройки, что позволило разработать рекомендации по повышению эффективности систем отопления в условиях эксплуатации г. Луганска.

Основные результаты диссертационной работы рекомендованы к рассмотрению Министерством строительства и жилищно-коммунального хозяйства ЛНР, использованы и внедрены на ГУП ЛНР «Лугансквода», ЧАО «Луганский завод «Сантехдеталь» при модернизации и обновлении систем отопления производственных участков и помещений, в проектной деятельности ООО «НК-ПРОМЭКСПЕРТ», в учебном процессе института строительства, архитектуры и жилищно-коммунального хозяйства (ИСА и ЖКХ) Луганского государственного университета имени Владимира Даля (ЛГУ им. В. Даля).

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Математическая модель тепловлагоденоса в четырехслойной ограждающей конструкции с учетом изменения влажности в процессе эксплуатации.

2. Аналитические выражения для коэффициентов теплопроводности и влагоденности типовых теплоизоляционных материалов.

3. Методика моделирования теплотехнических характеристик четырехслойной ограждающей конструкции с учетом изменения влажности в процессе эксплуатации.

4. Рекомендации по применению типовых теплоизоляционных материалов для жилых зданий массовой застройки г. Луганска.

Степень достоверности и апробация результатов работы.

Достоверность и обоснованность результатов и выводов диссертационной работы подтверждается корректным использованием математического аппарата, соответствием принятых допущений характеру решаемых задач. Экспериментальные данные теплофизических свойств теплоизоляционных материалов получены с помощью современных методов экспериментальных исследований и обоснованным выбором контрольно-измерительной аппаратуры, сопоставлением теоретических и экспериментальных данных, оценкой адекватности расчетных зависимостей. Достоверность подкрепляется значительным объемом тепловизионного обследования ограждающих конструкций

Основные положения диссертации были доложены, обсуждены и одобрены на следующих научных конференциях: VIII научно-практическая конференция с международным участием «Актуальные проблемы строительства, архитектуры и жилищно-коммунального хозяйства» (ЛНР, г. Луганск, 2023 г.); V открытая международная очно-заочная научно-практическая конференция молодых учёных и студентов «Энергосбережение в инженерных и энергетических системах зданий и сооружений» (ДНР, г. Макеевка, 2024 г.); Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Строительство и техносферная безопасность», (ЛНР, г. Антрацит, 2024 г.); IX научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием (ЛНР, г. Луганск, 2024 г.); XVII международная научно-практическая конференция «Методология безопасности среды жизнедеятельности» (Республика Крым, г. Симферополь, 2024 г.); VIII Международная научно-техническая конференция «Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства» (ЛНР, г. Алчевск, 2024 г.); VI открытая международная очно-заочная научно-практическая конференция молодых учёных и студентов «Энергосбережение в инженерных и энергетических системах зданий и сооружений» (ДНР, г. Макеевка, 2025 г.); X научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Актуальные проблемы урбанизированных территорий Донбасса» (ЛНР, г. Луганск, 2025 г.); V международная научно-практическая конференция KAZGORDAY 2025 (Казахстан, г. Алматы, 2025 г.).

В полном объеме диссертационная работа была доложена и одобрена на расширенном заседании кафедры вентиляции, теплогазо- и водоснабжения ИСА и ЖКХ ФГБОУ ВО «ЛГУ им. В. Даля».

Публикации.

По материалам диссертации опубликовано 21 научная работа, в том числе 7 статей в изданиях, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени кандидата наук.

Личный вклад соискателя состоит в постановке цели и задач исследования, непосредственном участии в теоретических и экспериментальных исследованиях диссертационной работы, обработке и интерпретации полученных данных, внедрении результатов исследований. Отдельные составляющие теоре-

тических и экспериментальных исследований работы выполнены с соавторами научных работ, изложенных в списке публикаций.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 разделов, заключения, списка литературы и приложений. Полный объем диссертации составляет 165 страниц, в том числе 138 страниц основного текста, список литературы из 159 источников на 18 страницах, приложений на 9 страницах, работа имеет 66 рисунков и 19 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, изложена научная новизна, теоретическая и практическая значимость, методология и методы исследования, приведены положения, выносимые на защиту диссертации, обоснована достоверность полученных результатов, даны сведения об апробации научных исследований и опубликованных научных работах, представлена информация по структуре и объему диссертации.

В первом разделе выполнен анализ современных методов определения теплотехнических характеристик теплоизоляционных материалов и ограждающих конструкций, обоснованы основные направления исследований для повышения эффективности систем отопления зданий.

Отмечено, что в настоящее время на рынке утеплителей представлен целый ряд отечественных теплоизоляционных материалов, среди которых наиболее распространенными в жилых зданиях массовой застройки являются IZOVOL из минеральной ваты на основе базальтовых пород, ТЕХНОФАС ПРОФ из каменной ваты и пенополистирол экструдированный ПЕНОПЛЕКС КОМФОРТ.

Показано, что современные методы определения теплотехнических характеристик ограждающих конструкций недостаточно точно позволяют прогнозировать реальное состояние конструкции в процессе эксплуатации, практически отсутствуют результаты исследований по влиянию влажности на коэффициенты теплопроводности и влагопроводности теплоизоляционных материалов. Требуют развития методики и программные средства для имитационного моделирования процессов тепловлагод переноса в многослойных ограждающих конструкциях жилых зданий массовой застройки.

В качестве основного направления для повышения эффективности систем отопления жилых зданий массовой застройки принята разработка рекомендаций по рациональному использованию типовых теплоизоляционных материалов для внешних ограждающих конструкций, построенных на основе достоверного прогноза тепловых потерь и оценки приведенных затрат. Повышение точности прогнозирования энергоэффективности и оценки экономической целесообразности можно достигнуть совершенствованием методов определения теплотехнических характеристик ограждающих конструкций.

На основании выполненного анализа состояния проблемы, научных работ по вопросам повышения эффективности систем отопления сформулированы цель и задачи исследования, приведенные в начале автореферата.

Во втором разделе предложена математическая модель тепловлагопереноса в четырехслойной ограждающей конструкции для расчета тепловых потерь систем отопления с учетом изменения влажности материалов в процессе эксплуатации.

Расчётная схема четырехслойной ограждающей конструкции представлена на рисунке 1. Данный конструктив состоит из внутреннего известкового штукатурного слоя – 1; кирпичной (или бетонной) стены – 2; теплоизоляционного материала – 3; слоя внешней штукатурки – 4. Каждый слой ограждающей конструкции имеет свою толщину δ_i , где i – номер слоя. Общая толщина всей конструкции стены $\delta = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \delta_4$.

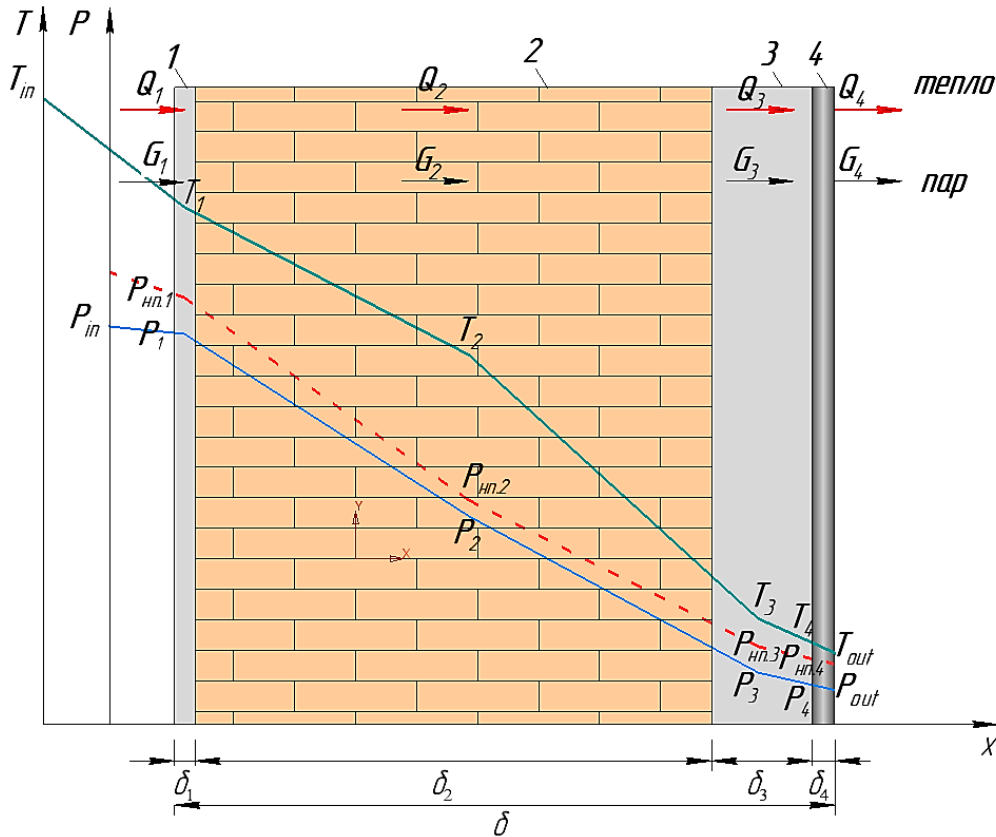


Рисунок 1 – Схема ограждающей конструкции

Для каждого i -того слоя ограждающей конструкции справедливо уравнение теплового потока и дифференциальное уравнение теплопроводности

$$q_i = -\lambda_i(W_i) \frac{\partial T_i}{\partial x}; \quad (1)$$

$$c_i(W_i) \rho_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_i(W_i) \frac{\partial T_i}{\partial x} \right), \quad (2)$$

где $q_i = Q_i / A$ – плотность теплового потока Q_i через площадь изотермической поверхности A в i -том слое ограждающей конструкции; T_i – температура в i -том слое; x – координата; W_i – влажность в i -том слое; $\lambda_i(W_i)$ – коэффициент теплопроводности в i -том слое как функция W_i ; $c_i(W_i)$ – теплоемкость материала i -того слоя как функция W_i ; ρ_i – плотность материала в i -том слое; t – время.

Граничные условия для температуры имеют вид:

$$\alpha_{in} (T_{in} - T_1(0)) = -\lambda_1(0) \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=0}; \quad (3)$$

$$T_1(\delta_1) = T_2(\delta_1); \quad (4)$$

$$T_2(\delta_1 + \delta_2) = T_3(\delta_1 + \delta_2); \quad (5)$$

$$T_3(\delta_1 + \delta_2 + \delta_3) = T_4(\delta_1 + \delta_2 + \delta_3); \quad (6)$$

$$-\lambda_4(\delta) \frac{\partial T_4}{\partial x} \Big|_{x=\delta} = \alpha_{out} (T_4(\delta) - T_{out}), \quad (7)$$

где T_{in} – температура внутри помещения здания; T_{out} – температура наружного воздуха, α_{in} и α_{out} – коэффициенты теплоотдачи на внутренней и внешней поверхности ограждающей конструкции.

Для каждого i -того слоя записано уравнение переноса водяного пара и дифференциальное уравнение его диффузии

$$G_i = -\mu_i(W_i) \frac{\partial P_i}{\partial x}; \quad (8)$$

$$\xi_i(W_i) \rho_n \frac{\partial P_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_i(W_i) \frac{\partial P_i}{\partial x} \right), \quad (9)$$

где G_i – поток водяного пара в i -том слое ограждающей конструкции; P_i – парциальное давление в i -том слое; $\mu_i(W_i)$ – коэффициент паропроницаемости i -того слоя как функция W_i ; ρ_n – плотность водяного пара; $\xi_i(W_i)$ – удельная пароемкость материала i -того слоя как функция W_i .

Граничные условия для парциального давления имеют вид:

$$P_1(0) = P_{in}; \quad (10)$$

$$P_1(\delta_1) = P_2(\delta_1); \quad (11)$$

$$P_2(\delta_1 + \delta_2) = P_3(\delta_1 + \delta_2); \quad (12)$$

$$P_3(\delta_1 + \delta_2 + \delta_3) = P_4(\delta_1 + \delta_2 + \delta_3); \quad (13)$$

$$P_4(\delta) = P_{out}, \quad (14)$$

где P_{in} – парциальное давление внутри помещения; P_{out} – парциальное давление наружного воздуха.

Для каждого i -того слоя ограждающей конструкции справедливо уравнение потока капельной влаги и дифференциальное уравнение влагопроводности

$$g_i = -\beta_i(W_i) \frac{\partial W_{fi}}{\partial x}; \quad (15)$$

$$\rho_i \frac{\partial W_{fi}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\beta_i(W_i) \frac{\partial W_{fi}}{\partial x} \right), \quad (16)$$

где g_i – поток капельной влаги в i -том слое; W_{fi} – капельная влажность в i -том слое; $\beta_i(W_i)$ – коэффициент влагопроводности в i -том слое как функция W_i .

Граничные условия для влагосодержания имеют вид:

$$W_{f1}(0) = W_{fin}; \quad (17)$$

$$W_{f1}(\delta_1) = W_{f2}(\delta_1); \quad (18)$$

$$W_{f2}(\delta_1 + \delta_2) = W_{f3}(\delta_1 + \delta_2); \quad (19)$$

$$W_{f3}(\delta_1 + \delta_2 + \delta_3) = W_{f4}(\delta_1 + \delta_2 + \delta_3); \quad (20)$$

$$W_{f4}(\delta) = W_{fout}, \quad (21)$$

где W_{fin} – влагосодержание внутри помещения; W_{fout} – влагосодержание наружного воздуха.

Влажность в i -том слое является суммой сорбционной влажности W_{si} и капельной влажности W_{fi}

$$W_i = W_{si} + W_{fi}. \quad (22)$$

Сорбционную влажность принято рассматривать как функцию относительной влажности воздуха

$$W_{si} = f(\varphi_i), \quad (23)$$

где $\varphi_i = P_i/P_{nn.i}$ – относительная влажность в i -слое; $P_{nn.i}$ – давления насыщенных паров в i -том слое

$$P_{nn.i} = 0,0215T_i^3 + 1,70T_i^2 + 48,08T_i + 613. \quad (24)$$

Принято считать, что если $\varphi_i < 1$, то вся влага идет на изменение сорбционной влажности материала, т.е.

$$W_i = W_{si} \text{ при } \varphi_i < 1. \quad (25)$$

Начальные условия при моделировании нестационарных тепловлажностных процессов принимались согласно известным подходам.

Как показывает анализ изменения теплофизических параметров в зависимости от влажности, что подтверждается в дальнейшем расчетами, наибольшее влияние на результаты моделирования оказывает изменение коэффициентов теплопроводности и влагопроводности, что позволяет принимать в рассмотрение только нормативные величины остальных параметров. Вместе с тем влияние сорбционной влажности на коэффициенты теплопроводности и влагопроводности рассматриваемых типовых теплоизоляционных материалов в настоящее время не изучено, что требует проведения отдельных экспериментальных исследований.

В третьем разделе выполнены экспериментальные исследования коэффициентов теплопроводности и влагопроводности типовых теплоизоляционных материалов IZOVOL, ТЕХНОФАС ПРОФ, ПЕНОПЛЕКС КОМФОРТ в зависимости от сорбционной влажности. Испытания проведены на лабораторных стендах в соответствии с ГОСТ 24816-81 и ГОСТ Р 56504-2015.

Коэффициенты теплопроводности испытуемых материалов описаны линейной эмпирической зависимостью

$$\lambda = \lambda_{\text{сух}} (1 + k \cdot W_{\text{si}}), \quad (26)$$

где k – коэффициент, зависящий от вида теплоизоляционного материала; $\lambda_{\text{сух}}$ – коэффициент теплопроводности материала в сухом состоянии.

По результатам лабораторных испытаний получены значения k : для IZOVOL – $k=0,043$, для ТЕХНОФАС ПРОФ – $k=0,041$, для ПЕНОПЛЕКС КОМФОРТ – $k=0,032$. Зависимости $\lambda = f(W_s)$ для типовых теплоизоляционных материалов показаны на рисунке 2.

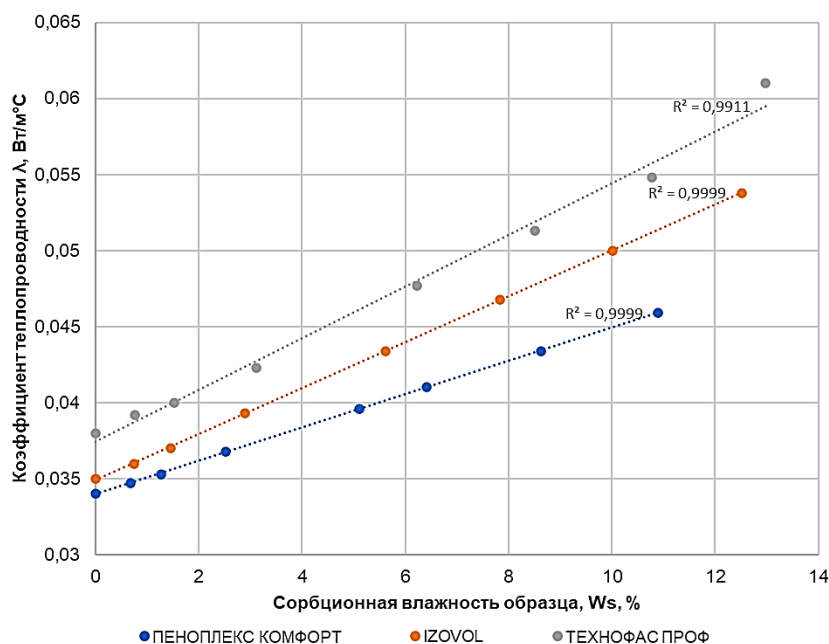


Рисунок 2 – Зависимости коэффициентов теплопроводности от сорбционной влажности

Изотермы сорбции исследуемых утеплителей представлены на рисунке 3.

Выполненные исследования полученных изотерм сорбции путём подбора линий тренда показали, что все изотермы сорбции аппроксимируются подобными функциями – полиномами третьей степени

$$W_s = A_1 \varphi + A_2 \varphi^2 + A_3 \varphi^3, \quad (27)$$

где A_1, A_2, A_3 – коэффициенты аппроксимации.

По изотермам сорбции определены коэффициенты аппроксимации A_1, A_2, A_3 для типовых теплоизоляционных материалов, значения которых приведены в таблице 1.

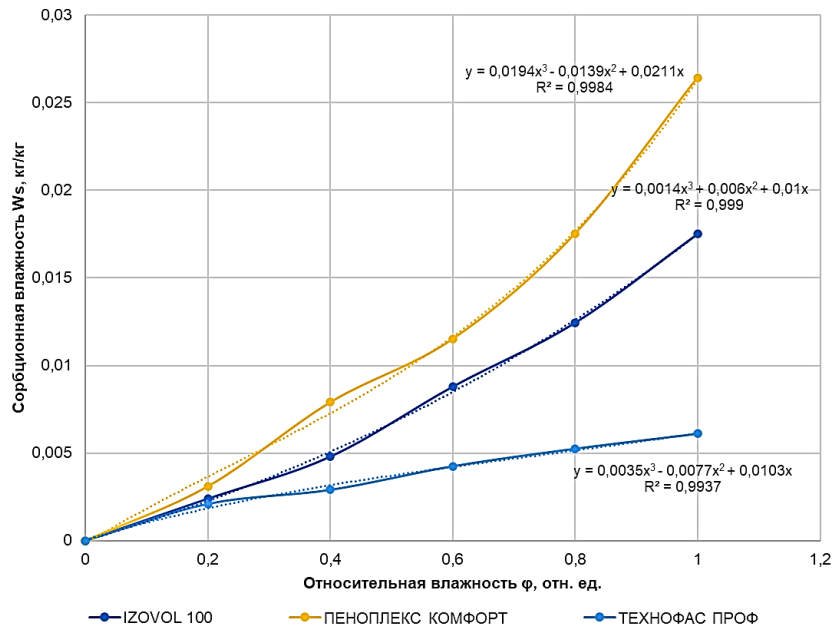


Рисунок 3 – Сорбционные свойства теплоизоляционных материалов

Таблица 1 – Значения коэффициентов A_1, A_2, A_3

Материал	Плотность, $кг/м^3$	Коэффициенты аппроксимации		
		A_1	A_2	A_3
IZOVOL	100	0,0072	-0,0103	0,0206
ТЕХНОФАСПРОФ	155	0,0065	-0,0097	0,0195
ПЕНОПЛЕКС КОМФОРТ	30	0,0245	-0,0320	0,0260

Коэффициент влагопроводности β представлен линейной зависимостью

$$\beta = B_0 W_{si} + B_1, \quad (28)$$

где B_0, B_1 – коэффициенты аппроксимации.

Значения B_0 и B_1 для типовых теплоизоляционных материалов приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Значения коэффициентов B_0, B_1

Материал	Плотность, $кг/м^3$	Коэффициенты аппроксимации	
		$B_0 \cdot 10^4$	$B_1 \cdot 10^2$
IZOVOL	100	0,057	-0,011
ТЕХНОФАСПРОФ	155	0,049	-0,019
ПЕНОПЛЕКС КОМФОРТ	30	1,370	-0,150

Оценка адекватности полученных аппроксимационных зависимостей для коэффициентов теплопроводности и коэффициентов влагопроводности от сорбционной влажности проводилась по критерию Фишера. Значения экспери-

ментального критерия Фишера $F_{\text{экс}} < 1,57$ не превышали табличного $F_T = 1,81$ при доверительной вероятности $\alpha = 0,95$, что позволило считать полученные аппроксимационные зависимости адекватными.

Наличие аналитических выражений (26) и (28) позволяет усовершенствовать методы определения теплотехнических характеристик ограждающих конструкций.

В четвертом разделе представлена методика моделирования теплотехнических характеристик четырехслойной ограждающей конструкции с учетом изменения влажности в процессе эксплуатации, позволяющая анализировать энергоэффективность и экономическую целесообразность применения теплоизоляционных материалов. В основе предложенной методики лежит математическая модель тепловлагоденоса в ограждающей конструкции с учетом экспериментально установленного влияния влажности на теплофизические свойства теплоизоляционных материалов.

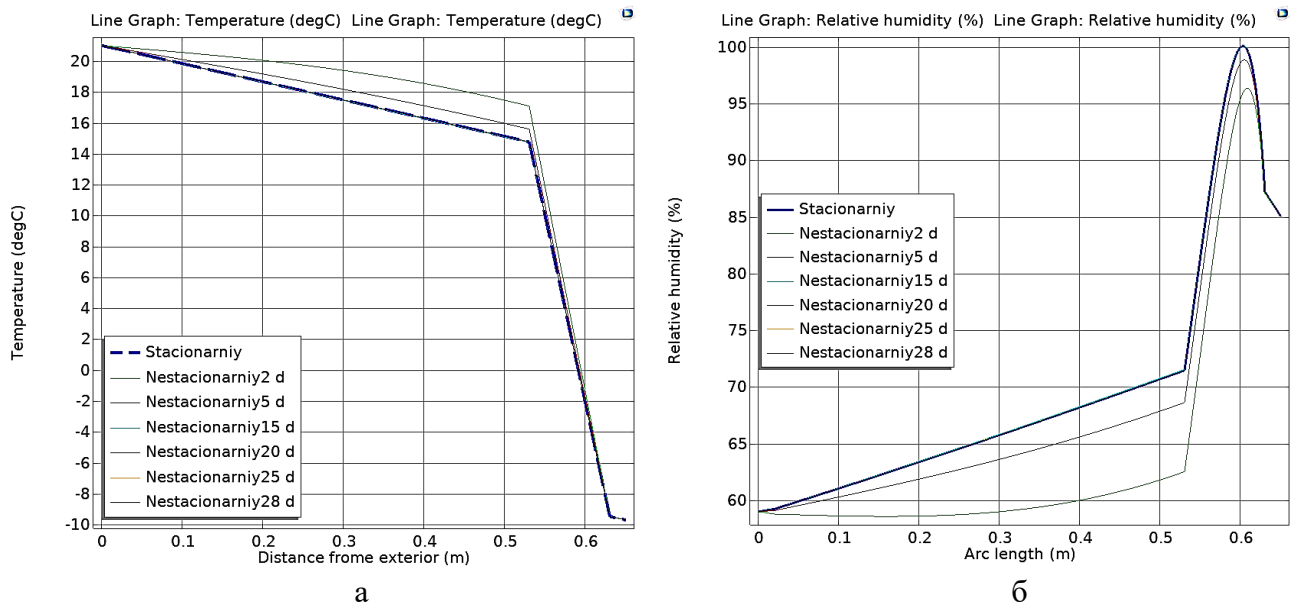
Методика моделирования реализована в среде пакета программ COMSOL Multiphysics 6.2, где с помощью интерфейсов Heat Transfer in Building Materials и Moisture Transport in Building Materials построена имитационная модель теплотехнических характеристик четырехслойной ограждающей конструкции для прогнозирования тепловых потерь систем отопления для климатических параметров г. Луганска.

Проведены исследования теплотехнических характеристик и тепловых потерь систем отопления жилых зданий массовой застройки для типовых теплоизоляционных материалов IZOVOL, ТЕХНОФАС ПРОФ, ПЕНОПЛЕКС КОМФОРТ. Для оценки точности расчётов по предложенной методике использованы результаты тепловизионного обследования теплотехнического состояния наружных ограждающих конструкций для эксплуатируемых жилых зданий г. Луганска.

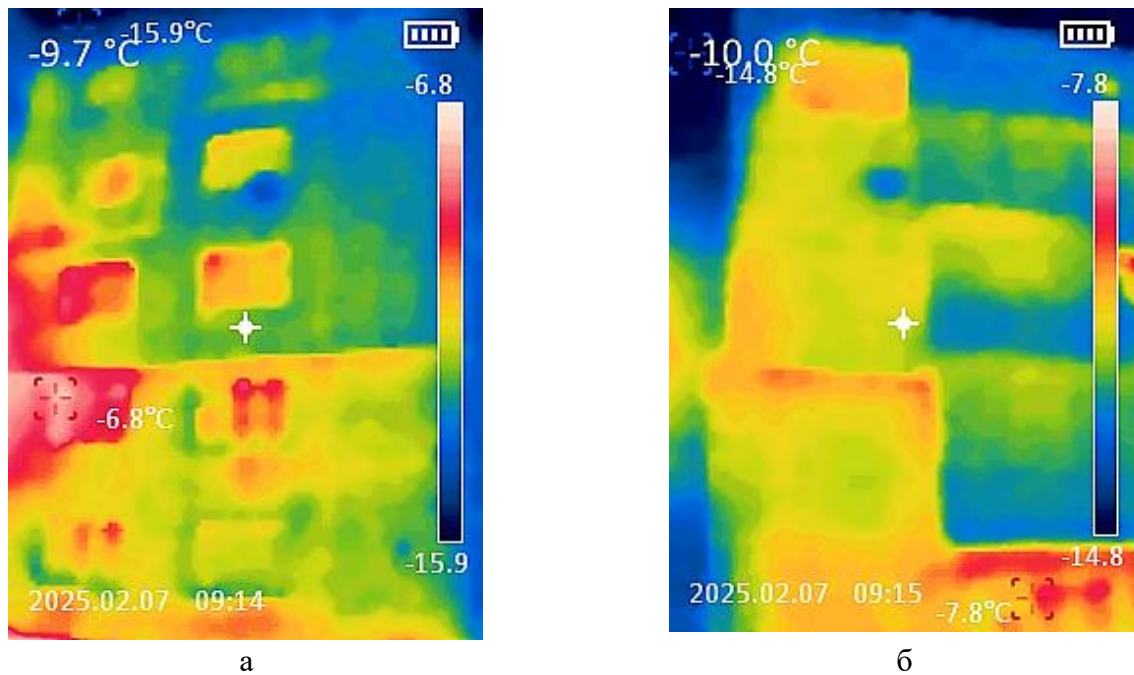
Конструкция наружной стены кирпичного дома со слоем теплоизоляционного материала представлена на рисунке 1. На рисунке 4 приведены результаты моделирования температурного поля и относительной влажности в ограждающей конструкции с утеплителем ПЕНОПЛЕКС КОМФОРТ на протяжении самого холодного месяца эксплуатации.

В сечении кирпичной кладки (рисунок 4, а) температура постепенно снижается от $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $14,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, а в слое теплоизоляционного материала быстро уменьшается до $-9,8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Относительная влажность (рисунок 4, б) по всей толщине кирпичной стены меняется равномерно от 59 % до 74 %, а в толщине утеплителя наблюдается резкий скачок величины влажности до максимального значения, а затем уменьшение до 86 %.

Внешняя термограмма тепловизионного обследования фасада здания с четырёхслойной ограждающей конструкцией представлена на рисунке 5. Фактическая температура на поверхности фронтальных и торцевых стен, утепленных теплоизоляционным материалом, колеблется в пределах $-9,3 \dots -9,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. По результатам компьютерного моделирования температура на внешней поверхности имеет значения $-9,6\text{ }^{\circ}\text{C}$.



а – графики изменения температуры; б – графики изменения влажности
Рисунок 4 – Распределение температуры и относительной влажности для фрагмента сплошной стены



а – фронтальная стена; б – торцевая стена
Рисунок 5 – Внешняя термограмма фасада здания

Конструкция наружной легкобетонной стены, состоящая из слоя штукатурки, легкобетонной стеновой панели толщиной 250 мм, теплоизоляционного материала и облицовочного слоя, представлена на рисунке 6. На рисунке 7 показаны результаты моделирования температурного поля и относительной влажности в ограждающей конструкции с утеплителем ПЕНОПЛЕКС КОМФОРТ на протяжении самого холодного месяца эксплуатации.

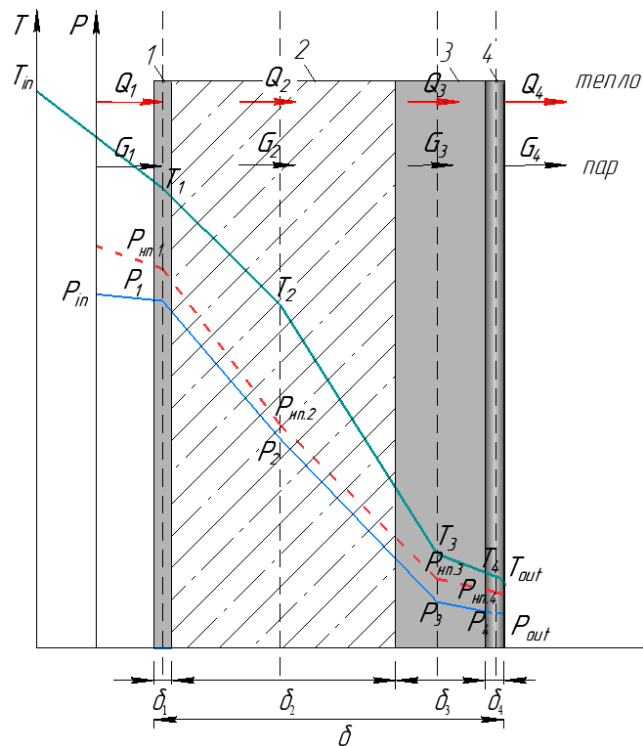
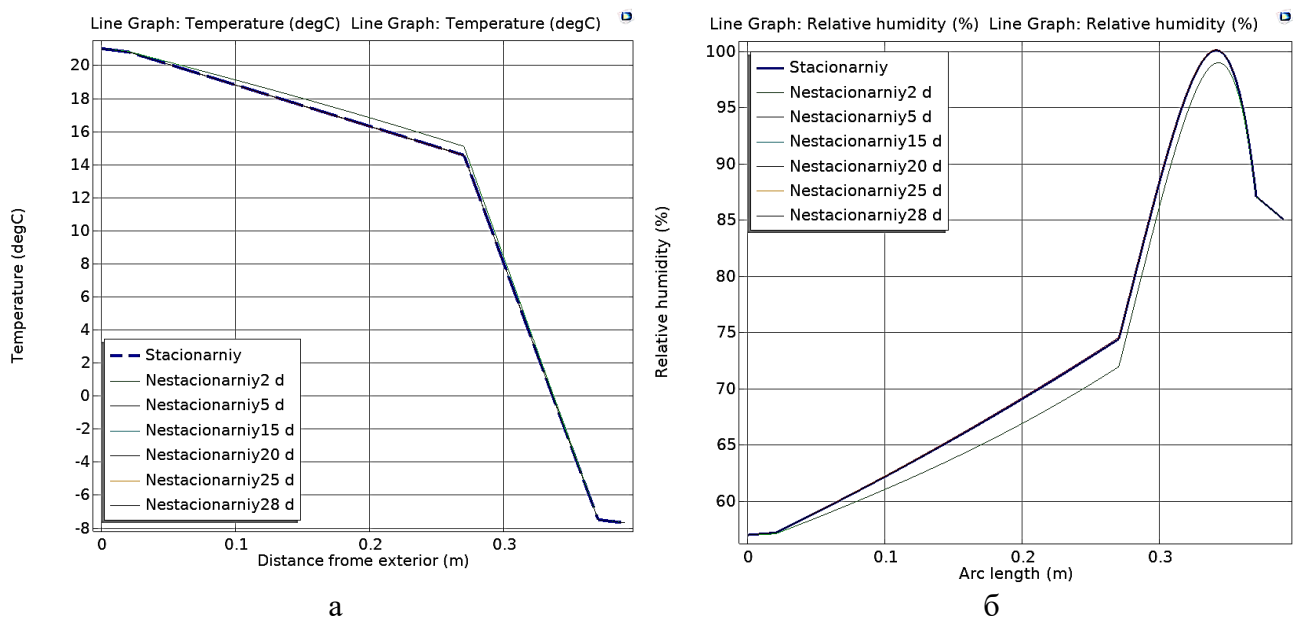


Рисунок 6 – Схема утепленной легкобетонной стены

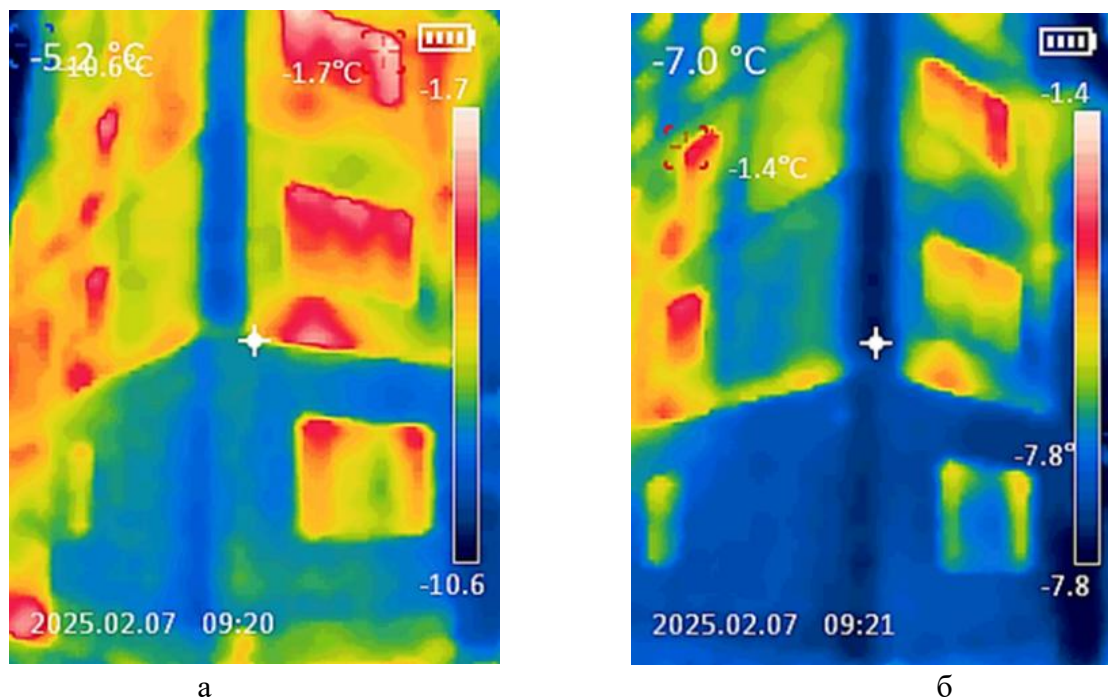


а – графики изменения температуры; б – графики изменения влажности

Рисунок 7 – Распределение температуры и относительной влажности для фрагмента сплошной стены

Как видно из рисунка 7 значение температуры в сечении материала стены постепенно снижается от $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $14,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, (рисунок 7, а), далее в слое утеплителя резко понижается до $-7,8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Относительная влажность (рисунок 7, б) по всей толщине панельной стены повышается равномерно от 57% до $78,3\%$, после чего в толщине утеплителя наблюдается возрастание значения влажности до максимального значения, а затем уменьшение до 86% .

Внешняя термограмма тепловизионного обследования фасада здания с четырёхслойной ограждающей конструкцией приведена на рисунке 8. Фактическая температура наружной поверхности стены здания, утепленной теплоизоляционным материалом, колеблется в пределах $-7,65...-7,71$ °C. По результатам компьютерного моделирования температура на внешней поверхности имеет значения $-7,7$ °C.



а – стена здания; б – фрагмент угла здания

Рисунок 8 – Внешняя термограмма фасада здания

Сравнение температур на поверхности стены, полученных по имитационной модели и с помощью тепловизионной съемки представлено в таблице 3.

Таблица 3 – Сравнение температур по результатам компьютерного моделирования и тепловизионной съемки

Конструкция стены	Материал утеплителя	t поверхности стены по	
		имитационной модели, °C	термограмме, °C
Кирпич	ПЕНОПЛЕКС	-9,6	-9,37...-9,5
Кирпич	ТЕХНОФАС	-8,3	-8,3...-8,4
Кирпич	IZOVOL	-11,5	-11,4...-11,8
Бетон	ПЕНОПЛЕКС	-7,7	-7,65...-7,71
Бетон	ТЕХНОФАС	-16,6	-16,71...-16,73
Бетон	IZOVOL	-11,9	-11,8...-12,1

Проведенное тепловизионное обследование утепленных ограждающих конструкций эксплуатируемых зданий с погрешностью до 2,6 % согласуется с результатами расчетов по предложенной методике.

В пятом разделе выполнен анализ энергоэффективности и экономической целесообразности применения типовых теплоизоляционных материалов для жилых зданий массовой застройки на примере г. Луганска, разработаны рекомендации по повышению эффективности систем отопления.

Оценка энергоэффективности теплоизоляционных материалов проведена по критерию Гагарина В.Г., Пастушкова П.П.

$$E_{\text{тепл.мат}} = \frac{T_{\text{долг}}}{C_{\text{утеп}} \lambda_{\text{утеп}}}, \quad (29)$$

где $T_{\text{долг}}$ – долговечность теплоизоляционного материала; $C_{\text{утеп}}$ – стоимость утеплителя; $\lambda_{\text{утеп}}$ – коэффициент теплопроводности теплоизоляционного материала.

Результаты оценки энергоэффективности типовых утеплителей по критерию (29) в диапазоне значений коэффициента теплопроводности при изменении влажности приведены в таблице 4. Как видно, наибольшей энергоэффективностью обладает теплоизоляционный материал ПЕНОПЛЕКС КОМФОРТ.

Таблица 4 – Результаты оценки энергоэффективности
типовых теплоизоляционных материалов

Теплоизоляционный материал	Энергоэффективность, $E_{\text{тепл.мат}}$
ПЕНОПЛЕКС КОМФОРТ	0,914...1,234
ТЕХНОФАС ПРОФ	0,540...0,867
IZOVOL	0,588...1,204

Анализ экономической целесообразности применения типовых утеплителей выполнен на основе оценки доли приведенных затрат $\Delta ПЗ$, обусловленных тепловыми потерями за весь отопительный период и капитальными затратами на приобретение утеплителя,

$$\Delta ПЗ = C_{\text{ин}} + E_n \cdot C_{\text{утеп}}, \quad (30)$$

где $E_n=0,15$ – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений; $C_{\text{ин}}$ – годовые эксплуатационные затраты, обусловленные тепловыми потерями за отопительный период.

Для определения годовых эксплуатационных затрат, обусловленных тепловыми потерями, с использованием разработанной имитационной модели выполнена оценка тепловых потоков для каждого месяца отопительного периода через четырехслойную ограждающую конструкцию с типовыми теплоизоляционными материалами. В качестве примера на рисунке 9 представлены ежемесячные потери для кирпичной стены с утеплителем IZOVOL.

Показано, что реальные тепловые потери через ограждающие конструкции с учетом изменения влажности в условиях эксплуатации г. Луганска существенно отличаются от результатов, полученных для нормативных условий

эксплуатации, в зависимости от вида применяемого утеплителя и месяца отопительного периода. Так, например, для кирпичных стен зданий при использовании теплоизоляционного материала IZOVOL расхождение результатов достигает 12,4 %, для панельных зданий с утеплителем ТЕХНОФАС ПРОФ максимальное расхождение составляет 9,8 %.

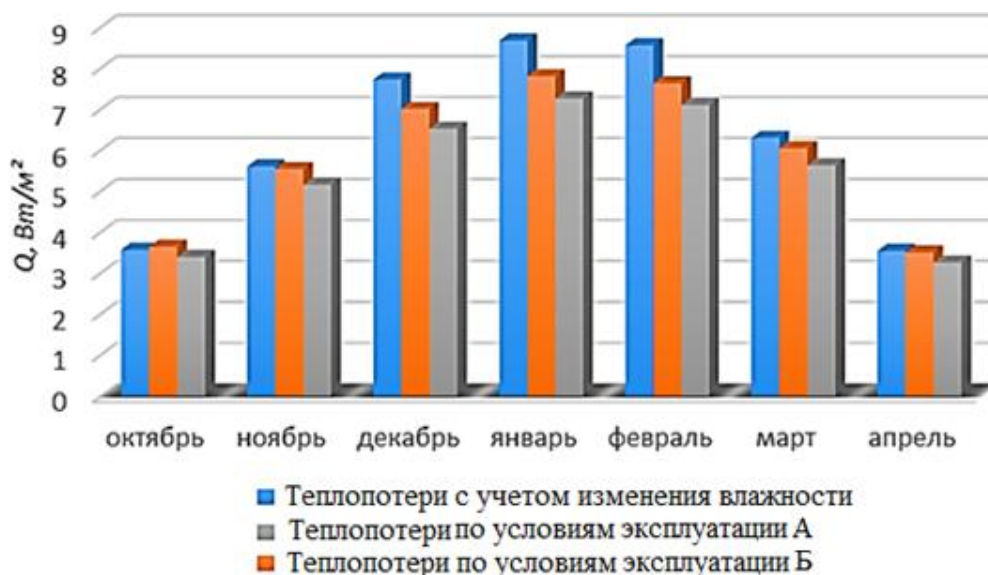


Рисунок 9 – Тепловые потери в отопительный период для ограждающей конструкции кирпичного здания с утеплителем IZOVOL

Результаты оценки экономической целесообразности применения типовых теплоизоляционных материалов при стоимости 1 Гкал 1740,1 руб. представлены в таблице 5. Как видно, более высокая экономическая эффективность (меньшие приведенные затраты) в условиях эксплуатации г. Луганска достигается при использовании в четырехслойной ограждающей конструкции утеплителя IZOVOL.

Таблица 5 – Результаты оценки экономической целесообразности применения типовых теплоизоляционных материалов

Ценовой параметр	ПЕНОПЛЕКС КОМФОРТ	ТЕХНОФАС ПРОФ	IZOVOL
Стоимость утеплителя $C_{утен.}, руб/м^2$	1192	1517	772
Эксплуатационные затраты, обусловленные тепловыми потерями $C_{тп}, руб/м^2$	44,83	85,16	48,92
Доля приведенных затрат $\Delta ПЗ, руб/м^2$	320,81	334,01	258,46

Применение полученных рекомендаций обеспечивает снижение приведенных затрат систем отопления жилых зданий массовой застройки до 4,9 % для зданий с кирпичными стенами и до 3,8 % для панельных зданий в условиях эксплуатации г. Луганска.

Рассмотренный подход к оценке экономической целесообразности применения типовых теплоизоляционных материалов может быть использован и в других регионах в соответствии с местными климатическими параметрами и ценовыми показателями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании выполненных исследований решена актуальная научно-практическая задача повышения эффективности систем отопления совершенствованием методов определения теплотехнических характеристик ограждающих конструкций, что обеспечивает повышение точности прогнозирования тепловых потерь и снижение приведенных затрат.

По результатам исследований сделаны следующие выводы:

1. Обоснована необходимость совершенствования методов определения теплотехнических характеристик ограждающих конструкций путем учета изменения влажности в процессе эксплуатации, что обеспечивает повышение точности прогнозирования тепловых потерь систем отопления.

2. Разработана математическая модель тепловлагоденоса в четырехслойной ограждающей конструкции, включающей внутренний штукатурный слой, материал стены здания, теплоизоляционный материал и наружный облицовочный слой. Модель описывает процессы теплопроводности, конвективного теплообмена, влагоденности и диффузии водяного пара с учетом межслойных и внешних граничных условий. Коэффициенты теплопроводности и влагоденности теплоизоляционных материалов рассматриваются как функции переменной в процессе эксплуатации сорбционной влажности, что позволило усовершенствовать методы определения теплотехнических характеристик ограждающих конструкций.

3. Разработан лабораторный стенд и методика обработки опытных данных для экспериментальных исследований коэффициентов теплопроводности и влагоденности теплоизоляционных материалов IZOVOL, ТЕХНОФАС ПРОФ, ПЕНОПЛЕКС КОМФОРТ отечественных производителей в условиях переменной влажности. По результатам экспериментов получены аппроксимационные зависимости для коэффициентов теплопроводности и влагоденности от сорбционной влажности. Зависимости имеют линейный характер, адекватность которых подтверждена по критерию Фишера.

4. Предложена методика моделирования теплотехнических характеристик четырехслойной ограждающей конструкции с учетом изменения влажности в процессе эксплуатации. На основе представленной методики разработана имитационная модель теплотехнических характеристик четырехслойной ограждающей конструкции в пакете программ COMSOL Multiphysics 6.2 для прогнозирования тепловых потерь систем отопления.

5. Выполнены исследования теплотехнических характеристик и тепловых потерь четырехслойной ограждающей конструкции для типовых теплоизоляционных материалов IZOVOL, ТЕХНОФАС ПРОФ, ПЕНОПЛЕКС КОМФОРТ отечественных производителей на примере жилых зданий массовой застройки г. Луганска. Проведенное тепловизионное обследование утепленных ограждающих конструкций эксплуатируемых зданий с погрешностью до 2,6 % согласуется с результатами расчетов по предложенной методике.

6. Показано, что реальные тепловые потери через ограждающие конструкции с учетом изменения влажности в условиях эксплуатации г. Луганска существенно отличаются от результатов, полученных для нормативных условий эксплуатации, в зависимости от вида применяемого утеплителя и месяца отопительного периода. Так, для кирпичных стен зданий при использовании теплоизоляционного материала IZOVOL расхождение результатов достигает 12,4 %, для панельных зданий с утеплителем ТЕХНОФАС ПРОФ максимальное расхождение составляет 9,8 %.

7. Выполнен анализ энергоэффективности и экономической целесообразности применения типовых теплоизоляционных материалов для жилых зданий массовой застройки, приведена методика оценки срока их окупаемости. Разработаны рекомендации по повышению эффективности систем отопления путем рационального применения теплоизоляционных материалов в ограждающих конструкциях. Использование предложенных рекомендаций обеспечивает снижение приведенных затрат систем отопления жилых зданий массовой застройки до 4,9 % для зданий с кирпичными стенами и до 3,8 % для панельных зданий в условиях эксплуатации г. Луганска.

Основные результаты диссертационной работы рекомендованы к рассмотрению Министерством строительства и жилищно-коммунального хозяйства ЛНР, использованы и внедрены на ГУП ЛНР «Лугансквода», ЧАО «Луганский завод «Сантехдеталь» при модернизации и обновлении систем отопления производственных участков и помещений, в проектной деятельности ООО «НК-ПРОМЭКСПЕРТ», в учебном процессе ИСА и ЖКХ ЛГУ им. В. Даля, что подтверждается соответствующими документами. Ожидаемый годовой экономический эффект от модернизации системы отопления цеха металлоконструкций ЧАО «Луганский завод «Сантехдеталь» составляет 157,8 тыс. руб.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях:

1. **Малыгина, О.А.** Анализ теплотехнических свойств наружной ограждающей конструкции по итогам натурных испытаний / О.А. Малыгина // Современные проблемы гражданской защиты. – 2024. – № 2 (51). – С. 129-139.

2. **Малыгина, О.А.** Экспериментальное определение коэффициента теплопроводности теплоизоляционных материалов во влажном состоянии / О.А. Малыгина, В.В. Засько // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2024. – № 5(169). – С. 5-14.

3. **Малыгина, О.А.** Разработка математических моделей определения тепло-влажностного режима ограждающих конструкций зданий при нестационарном тепловом потоке / О.А. Малыгина // Современные проблемы гражданской защиты. – 2024. – №3(52). – С. 93-104.

4. **Малыгина, О.А.** Имитационное моделирование тепловлажностного состояния ограждающих конструкций зданий с вентилируемым фасадом в COMSOL Multiphysics / О.А. Малыгина // Сантехника, отопление, кондиционирование. – 2024. – № 9. – С. 60-63.

5. **Малыгина, О.А.** Моделирование тепловлажностного состояния для углов зданий в нестационарном режиме в городе Луганске / О.А. Малыгина // Сантехника, отопление, кондиционирование. – 2024. – № 10. – С. 42-45.

6. **Малыгина, О.А.** Имитационное моделирование тепловлажностного состояния ограждающих конструкций зданий в нестационарном режиме / О.А. Малыгина, В.В. Засько // Современные проблемы гражданской защиты. – 2024. – № 4 (53). – С. 85-96.

7. **Малыгина О.А.** Создание модели тепловлажностного режима эксплуатации для зданий массовой застройки с утеплителем ТЕХНОФАС ПРОФ / О.А. Малыгина // Сантехника, отопление, кондиционирование. – 2025. – № 4 – С. 52-56.

Публикации в других изданиях:

8. Засько, В.В. Анализ конструктивных решений систем теплоизоляции наружных стен / В.В. Засько, **О.А. Малыгина** // Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении: Сб. науч. тр. – Луганск: ЛГУ им. В. Даля, 2023. – № 3(44). – С. 77-86.

9. Засько, В.В. Анализ влияния внешних воздействий на теплофизические и длительные механические свойства минераловатных плит / В.В. Засько, **О.А. Малыгина**, В.А. Сорокин // Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении: Сб. науч. тр. – Луганск: ЛГУ им. В. Даля, 2023. – № 4(45). – С. 110-118.

10. Засько, В.В. Анализ современных теплоизоляционных материалов в строительстве / В.В. Засько, **О.А. Малыгина** // Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении: Сб. науч. тр. – Луганск: ЛГУ им. В. Даля, 2023. – № 4(45). – С. 119-126.

11. Засько, В.В. Организация строительного контроля по параметрам энергетической эффективности / В.В. Засько, **О.А. Малыгина** // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. – Луганск: ЛГУ им. В. Даля. – 2023. – № 12(78). – С. 56-61.

12. Малыгина, О.А. Тепловизионное обследование зданий и сооружений / **О.А. Малыгина**, М.В. Пилавов, В.В. Засько // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. – Луганск: ЛГУ им. В. Даля. – 2024. – № 12(90). – С. 46-50.

Доклады на научных конференциях:

13. **Малыгина, О.А.** Организация строительного контроля по параметру энергетической эффективности / В.В. Засько, О.А. Малыгина // Актуальные проблемы строительства, архитектуры и жилищно-коммунального хозяйства: материалы научно-практической конференции с международным участием 14 декабря 2023 г., г. Луганск. – Луганск: ЛГУ им. В. Даля, 2023. – С. 54-56.

14. Засько, В.В. Экспериментальное исследование зависимости равновесной сорбционной влажности минераловатных изделий от температуры / В.В. Засько, **О.А. Малыгина** // Строительство и техносферная безопасность:

сб. науч. труд. по материалам всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых 15-17 февраля 2024 г., г. Антрацит. – Луганск: ИП Орехов Д.А., 2024. – С. 41-46.

15. Засько, В.В. Тепловизионное обследование ограждающих конструкций, эксплуатируемых после реконструкции / В.В. Засько, **О.А. Малыгина** // Энергоресурсосбережение в инженерных и энергетических системах зданий и сооружений: элект. сб. науч. труд. V открытой международной очно-заочной научно-практической конференции молодых ученых и студентов. – Макеевка: ФГБОУ ВО «ДОННАСА», 2024. – С. 183-188.

16. **Малыгина, О.А.** Экспериментальное определение коэффициента теплопроводности теплоизоляционных материалов во влажном состоянии / О.А. Малыгина, В.В. Засько // Методология безопасности среды жизнедеятельности: элект. сб. науч. труд. XVII международной научно-практической конференции. – Симферополь: ИТ «АРИАЛ», 2024. – С. 440-443.

17. **Малыгина, О.А.** Моделирование тепловлажностного состояния ограждающих конструкций зданий / О.А. Малыгина, В.В. Засько // Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства: материалы XVIII международной научно-практической конференции 23-24 октября 2024 г. – Алчевск: ФГБОУ ВО «ДонГТУ», 2024. – С. 358-359.

18. **Малыгина, О.А.** Анализ теплотехнических свойств наружной ограждающей конструкции по итогам натурных испытаний / О.А. Малыгина, В.В. Засько // Актуальные проблемы урбанизированных территорий Донбасса: материалы IX научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных 18 апреля 2024 г., г. Луганск. – Луганск: ЛГУ им. В. Даля, 2024. – С. 133-135.

19. **Малыгина, О.А.** Моделирование тепловлажного состояния для зданий массовой застройки в г. Луганске / О.А. Малыгина, М.В. Пилавов, В.В. Засько // Энергоресурсосбережение в инженерных и энергетических системах зданий и сооружений: элект. сб. науч. труд. VI открытой международной очно-заочной научно-практической конференции молодых ученых и студентов. – Макеевка: ФГБОУ ВО «ДОННАСА», 2025. – С. 63-68.

20. **Малыгина, О.А.** Повышение эффективности систем отопления совершенствованием методов определения теплотехнических характеристик ограждающих конструкций / О.А. Малыгина // Актуальные проблемы урбанизированных территорий Донбасса: материалы X научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных 24 апреля 2025 г., г. Луганск. – Луганск: ЛГУ им. В. Даля, 2025. – С. 78-80.

21. **Малыгина, О.А.** Имитационное моделирование тепловлажностного состояния ограждающих конструкций зданий / О.А. Малыгина // KAZGORDAY 2025: Труды V Международной научно-практической конференции, посвященной 95-летию зарождения проектного дела в Республике Казахстан 22-23 мая 2025 года. – Алматы: Проектная академия «KAZGOR», 2025. – С. 153-160.

АВТОРЕФЕРАТ

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ОТОПЛЕНИЯ
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕМ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ**

МАЛЫГИНА ОКСАНА АЛЕКСАНДРОВНА

Подписано в печать 02.10.2025 г.
Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура Times.
Печать лазерная. Усл. печ. лист 1,0.
Тираж 100 экз. Изд. № ____ .

**Издательство
Луганского государственного университета
имени Владимира Даля**

Адрес издательства: 291034, г. Луганск, кв. Молодежный, 20А
Тел.: +7(959) 138-34-80
E-mail: izdat.lguv.dal@gmail.com