

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ЛУГАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ ВЛАДИМИРА ДАЛЯ»

На правах рукописи

Малыгина - УДК 697.1

МАЛЫГИНА ОКСАНА АЛЕКСАНДРОВНА

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

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

Диссертация

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент

Пилавов Манолис Васильевич

Идентичность всех экземпляров заверяю.

Учёный секретарь диссертационного совета

Д 24.2.486.02



В.В. Засько

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ.....	5
РАЗДЕЛ 1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА, ПОСТАНОВКА ЦЕЛИ И ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	11
1.1 Основные направления повышения эффективности систем отопления жилых зданий массовой застройки.....	12
1.2 Теплоизоляционные материалы для наружных ограждающих конструкций.....	15
1.3 Методы определения теплотехнических характеристик наружных ограждающих конструкций.....	19
1.3.1 Общая характеристика методов определения теплотехнических характеристик ограждающих конструкций зданий	19
1.3.2 Стационарные методы расчёта влажностного режима ограждающих конструкций.....	24
1.3.3 Нестационарные методы расчета влажностного режима ограждающих конструкций.....	28
1.4 Пакеты программ для моделирования процессов тепловлагоденоса....	36
Выводы по первому разделу, цель и задачи исследования.....	37
РАЗДЕЛ 2 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЕПЛОВЛАГОПЕРЕНОСА В ЧЕТЫРЕХСЛОЙНОЙ ОГРАЖДАЮЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ.....	40
2.1 Расчётная схема четырехслойной ограждающей конструкции.....	40
2.2 Математическое описание основных процессов тепловлагоденоса в ограждающих конструкциях.....	42

2.3 Математическая модель тепловлагопереноса в четырехслойной ограждающей конструкции с учетом изменения влажности в процессе эксплуатации.....	52
Выводы по второму разделу.....	57
РАЗДЕЛ 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	59
3.1 Лабораторный стенд.....	59
3.2 Методика обработки экспериментальных данных.....	62
3.3 Экспериментальные исследования влияния влажности на коэффициент теплопроводности.....	64
3.4 Экспериментальные исследования влияния влажности на коэффициент влагопроводности.....	69
3.5 Оценка адекватности полученных аппроксимационных зависимостей...	73
Выводы по третьему разделу.....	74
РАЗДЕЛ 4 МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЧЕТЫРЕХСЛОЙНОЙ ОГРАЖДАЮЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ.....	76
4.1 Методика моделирования теплотехнических характеристик четырехслойной ограждающей конструкции с учетом изменения влажности в процессе эксплуатации.....	76
4.2 Расчётные схемы исследуемых наружных ограждающих конструкций.....	78
4.2.1 Ограждающая конструкция кирпичного здания с теплоизоляционным материалом ПЕНОПЛЕКС КОМФОРТ.....	80
4.2.2 Ограждающая конструкция кирпичного здания с теплоизоляционным материалом ТЕХНОФАС ПРОФ.....	85
4.2.3 Ограждающая конструкция кирпичного здания с теплоизоляционным материалом IZOVOL.....	91

4.2.4 Ограждающая конструкция панельного здания с теплоизоляционным материалом ПЕНОПЛЕКС КОМФОРТ.....	98
4.2.5 Ограждающая конструкция панельного здания с теплоизоляционным материалом ТЕХНОФАС ПРОФ.....	104
4.2.6 Ограждающая конструкция панельного здания с теплоизоляционным материалом IZOVOL.....	110
4.2.7 Ограждающая конструкция кирпичной стены с вентилируемым фасадом и теплоизоляционным материалом ПЕНОПЛЕКС КОМФОРТ.....	115
4.3. Сравнительный анализ полученных температур на поверхности наружных ограждающих конструкций по результатам моделирования и с помощью тепловизионной съемки.....	122
Выводы по четвертому разделу.....	123
РАЗДЕЛ 5 ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ОТОПЛЕНИЯ ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ МАССОВОЙ ЗАСТРОЙКИ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ Г. ЛУГАНСКА.....	124
5.1 Анализ энергоэффективности и экономической целесообразности применения типовых теплоизоляционных материалов для жилых зданий массовой застройки на примере г. Луганска.....	124
5.2 Методика оценки срока окупаемости теплоизоляционных материалов.....	130
Выводы по пятому разделу.....	134
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	136
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	139
ПРИЛОЖЕНИЯ	157

ВВЕДЕНИЕ

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 тепловлагоденоса 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 тепловлагоденностных 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 тепловлагопереноса 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., Тертничник 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 влагоденосности 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, влагоденосности 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 тепловлагопереноса 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 влагопроводности 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 тепловлагопереноса в четырехслойной ограждающей конструкции с учетом изменения влажности в процессе эксплуатации.
2. Аналитические выражения для коэффициентов теплопроводности и влагопроводности 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.

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 20 научных работ, 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 теоретических 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 163 страницы, в том числе 136 страниц основного текста, список литературы из 159 источников на 18 страницах, приложений на 9 страницах, работа имеет 66 рисунков и 19 таблиц.

РАЗДЕЛ 1

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА, ПОСТАНОВКА ЦЕЛИ И ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Основные направления повышения эффективности систем отопления жилых зданий массовой застройки

Ограждающие конструкции жилых зданий массовой застройки г. Луганска, построенные в 60–70-х годах прошлого столетия, не соответствуют современным требованиям по тепловой защите. Для повышения эффективности систем отопления этих зданий необходима дополнительная теплоизоляционная защита. Одним из направлений решения этой проблемы является использование эффективных теплоизоляционных материалов в ограждающих конструкциях.

Системы отопления — это набор технических элементов и устройств, предназначенных для поддержания в помещении необходимой комфортной температуры путём уменьшения температурных потерь через наружные ограждающие конструкции.

Эффективность системы отопления жилых зданий массовой застройки достигается путём модернизации оборудования, использования специальных датчиков, применения теплообменников, изменения схемы централизованного теплоснабжения, применение возобновляемых источников тепловой и электрической энергии, использования в ограждающих конструкциях современных теплоизоляционных материалов.

Одним из основных направлений повышения эффективности систем отопления жилых зданий массовой застройки является применение утеплителей в ограждающих конструкциях.

Для повышения эффективности систем отопления эксплуатируемых зданий используется большое разнообразие типов конструктивных решений их фасадов. Необходимый уровень тепловой защиты данных конструкций достигается с применением таких методов:

- применение утеплителей с хорошими теплоизоляционными свойствами;
- проектирование рациональных решений конструкций стен;
- увеличение термических свойств фасадов, путём получения их однородности;
- оптимизация слоёв ограждающей конструкции.

Возможно комбинирование методов для улучшения эффективности теплотехнических свойств конструкций стен зданий.

В конце 2009 года в России принят Федеральный закон № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности, и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» [1], определяющий основные требования к энергетической эффективности зданий. В соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации № 18 от 25 января 2011 года [2], и приказом Министерства регионального развития РФ № 224 от 17 мая 2011 года [3] основным критерием оценки теплозащитных свойств и энергетической эффективности зданий является показатель удельного годового расхода тепловой энергии. Этот показатель отражает количество тепловой энергии, необходимое для отопления и вентиляции здания в течение года, рассчитанное на единицу площади (1 м^2) отапливаемого пространства.

В 80-х годах прошлого столетия разработан метод комплексной оценки тепловой эффективности наружных стен [4], позволяющий проводить анализ тепловой эффективности многослойных ограждающих конструкций стен путём получения зависимостей между общим расходом тепла и сопротивлением теплопередаче конструкции ограждения.

Вопросы повышения эффективности конструкций зданий рассмотрены в работах Гагарина В.Г. [5, 6], Перехоженцева А.Г. [7, 8], Ватина И.И. [9, 10], Куприянова В.Н. [11], Самарина О.Д. [12], Корниенко С.В. [13-14] и др.

Разработки учёных Шойхет Б.М. [15] и Корнилова Т.А. [16] на примере ограждающих конструкций навесных фасадов с вентилируемой прослойкой показали влияние свойств теплоизоляционных материалов, конструктивных особенностей и качества выполняемых монтажных работ на энергоэффективность этих систем.

Монастырёв П.В., Езерский В.А. [17] провели исследования влияния параметров объемно-планировочного решения зданий на потребность в теплоэнергии. Эти исследования показали, что применение высококачественных долговечных материалов для улучшения тепловой защиты ограждающих конструкций приводит к значительной экономии денежных средств.

Куприяновым В.Н. в работе [11] на основе экспериментальных исследований представлены результаты влияния эксплуатационных параметров на составляющие ограждающей конструкции со слоем внешней штукатурки. Учёным была разработана и предложена методика определения эксплуатационного тепловлажностного состояния теплоизоляционных материалов наружной ограждающей конструкции.

Хуторный А.Н. [18] предложил способ увеличения теплозащитных свойств ограждающих конструкций зданий с помощью устройства вертикальных керамзитобетонных теплоизоляционных вставок в самих стенах.

Учёт накопления влаги в конструктивах наружных стен, особенно в зимний период и проектирование таких конструкций рассмотрены в работе Перехоженцева А.Г. [19].

В работе Бородина А.И. [20] предложено математическое выражение для определения необходимого значения сопротивления теплопередаче, которое учитывает отсутствие образования конденсации на внутренней поверхности ограждения.

В труде [21] рассмотрен динамический подход к улучшению теплотехнических параметров участков ограждающих конструкций стен без оконных и дверных проёмов, заключающегося в перемещении потока воздуха в

толщине стены параллельно ее плоскости с выходом в помещение или в окружающую среду.

Ерёмкин А.И. [22] разработал методику исследования систем теплоснабжения, основанную на проведении анализа работы источников тепловой энергии и тепловых сетей с учетом оценки надежности и энергетической эффективности работы системы теплоснабжения.

Долгов Н.В. [23] в качестве улучшения теплотехнических параметров зданий рекомендует использовать комбинированные системы теплоснабжения на базе солнечных коллекторов.

Одним из способов повышения теплозащитных свойств ограждающих конструкций является исследование их теплопередачи. В этом направлении работали Франчук А.У., Богословский В.Н., Гагарин В.Г., Корниенко С.В., Рубашкина Т.Г. [24] и др.

1.2 Теплоизоляционные материалы для внешних ограждающих конструкций

В ограждающих конструкциях применяются теплоизоляционные материалы, предназначенные для увеличения внешней теплозащиты зданий и сохранения их тепловой энергии. Данные утеплители должны быть негорючими, долговечными, обладать хорошими теплоизолирующими характеристиками. Теплоизоляционные материалы для ограждающих конструкций классифицируются по разным признакам:

- по форме;
- по виду исходного сырья;
- по плотности;
- по теплопроводности;
- по структуре;
- по назначению.

Теплоизоляционные материалы бывают неорганические и органические. К неорганическим относятся такие утеплители, как минеральная вата, стекловата и пеностекло. Органические теплоизоляционные материалы включают в себя пенополистирол, древесноволокнистые плиты, арболит, газонаполненные массы, газобетон и другие.

За последнее время на российском строительном рынке появились десятки новых теплоизоляционных материалов, которые произвели значительный прорыв в сфере энергосбережения. Современные теплоизоляционные материалы стали более эффективными, экологически безопасными с различными свойствами и фактурой. Их можно использовать при строительстве новых или реконструкции ранее построенных объектов различного назначения. Вводимый в конструкции стены теплоизоляционный слой, обеспечивает требуемые теплозащитные свойства конструкции в течение заданного периода эксплуатации.

Существует множество конструктивных решений утепления ограждающих конструкций. К ним относятся: наружное утепление с помощью разнообразных утеплителей со штукатурным слоем или с устройством вентилируемого фасада [25].

Начиная с 1980-х годов за рубежом, а затем, с середины 1990-х годов, и в России, активно внедряется практика наружной теплоизоляции ограждающих конструкций. Эта технология предполагает использование различных способов крепления утеплителей, поверх которых наносится слой наружной штукатурки [26].

Немецкий учёный Nebgen Н. показал, что применение правильного рационального подхода к теплоизоляции стен зданий позволяет сократить расходы энергии инженерного оборудования минимум в два раза [27].

Оценка влияния влажности материала на его теплоэнергетические свойства, долговечность всей конструкции здания выполнена в работах советских ученых Фокина К.Ф. [28], Франчука А.У. [29], Богословского В.Н. [30].

Богословский В.Н. в своей работе [31] привёл рекомендации, позволяющие снизить тепловые поступления для ограждающих конструкций с устройством

вентилируемого фасада при нестационарном режиме эксплуатации при помощи использования материалов с повышенной воздухопроницаемостью.

Учёные Береговой А.М. [32], Денисов Д.Ю., Ковков И.В., Пучка О.В. [33-35] в качестве теплоизоляционных материалов использовали материалы на основе жидкого стекла. Лабораторией Берегового А.М. были разработаны новые утеплители (пеностекольный композит, пенокерамика).

В работе Бернадского А.Ф. [36] показан опыт использования для изготовления теплоизоляционных материалов древесных отходов.

Гнездилова О.А. [37] предложила использовать для утепления ограждающих конструкций литые поропласты, которые заливаются в кирпичную кладку при возведении здания.

Рубашкина Т.Г. [24] обосновала целесообразность использования местных читинских утеплителей для Забайкалья.

В настоящее время в мире выпускаются разнообразные теплоизоляционные материалы. В Российской Федерации основными производителями утеплителей для ограждающих конструкций являются: «ТехноНиколь», «Роквул» (Rockwool), «Изорок» (Isoroc), «Пеноплекс».

В городе Луганске широкое применение в последнее время находят такие российские теплоизоляционные материалы как [38]:

- утеплитель IZOVOL из минеральной ваты на основе базальтовых пород;
- утеплитель ТЕХНОФАС ПРОФ фирмы ТЕХНОНИКОЛЬ из каменной ваты (базальтовой плиты);
- пенополистирол экструдированный ПЕНОПЛЕКС КОМФОРТ.

Утеплители IZOVOL – это жесткие гидрофобизированные теплоизоляционные плиты, изготовленные из минеральной ваты на основе базальтовых пород. Они выпускаются плотностью 35...200 кг/м³.

Утеплитель ТЕХНОФАС ПРОФ это разновидность каменной ваты на основе базальтовых пород. Этот материал выпускается плотностью 155 кг/м³.

Пенополистирол экструдированный ПЕНОПЛЕКС КОМФОРТ – это теплоизоляционные плиты из экструзионного пенополистирола. Он выпускается толщиной 20...100 мм, плотностью 28–30,5 кг/м³.

Теплопроводность этих материалов характеризуется коэффициентом теплопроводности λ Вт/(м·°С). Этот коэффициент является основной характеристикой теплоизоляционных материалов [37], показывающий количество тепла, проходящего через образец материала. толщиной 1 м и площадью 1 м² при разности температур на противоположных поверхностях 1 °С за 1 ч.

В действующем СП 50.13330.2024 «Тепловая защита зданий» [39] при оценке теплотехнических характеристик многослойных конструкций стен зданий учитывается влажность только для двух условий эксплуатации – А или Б. Однако в реальных условиях эксплуатации ограждающих конструкций влажностный режим может значительно отличаться от предлагаемого при расчете по [39] в зависимости от климатических условий места строительства.

Существующие нормы проектирования [39] игнорируют влияние колебаний температуры и влажности, которые возникают внутри строительных конструкций, что обусловлено климатическими условиями и различными факторами эксплуатации, такими как нестабильность вентиляционных систем, аварии отопления и водоснабжения, а также нестационарные процессы теплопередачи.

1.3 Методы определения теплотехнических характеристик наружных ограждающих конструкций

1.3.1 Общая характеристика методов определения теплотехнических характеристик ограждающих конструкций зданий

Вопросу теории теплопроводности теплоизоляционных материалов посвящены исследования Егера Д.К. и Карслоу Г.С. [40], Лыкова А.В. [41], Алифанова О.М. [42], Карташова Э.М. [43], Никитенко Н.И. [44], Зарубина В.С.

[45], Коздобы Л.А. [46], Слесаренко А.П. и Рвачева В.Л. [47], Камьи Ф.М. [48] Постольника Ю.С. [49], Рядно А.А. и Беляева Н.М. и [50] и др.

Теплофизические характеристики теплоизоляционных материалов и их влияние на теплотехнические свойства ограждающих конструкций рассмотрены в работах Мачинского В.Д. [51], Фокина К.Ф. [52, 28], Лыкова А.В. [41, 53], Богословского В.Н. [31, 54], Ильинского В.М. [55], Франчука А.У. [29, 56] и др. В их работах показаны методики расчёта тепловлагоденоса в ограждающих конструкциях.

Для нормального функционирования существующих и строящихся зданий необходимо учитывать совместное действие тепловлагоденоса в ограждающих конструкциях зданий [41, 57-64]. Особенность этой проблемы заключается в том, что процесс влагоденоса обладает значительно большей инерционностью по сравнению с процессом переноса тепла. Для моделирования этого процесса разработаны различные математические модели, учитывающие стационарное и нестационарное распределение теплоты по толще ограждающей конструкции [65-72]. В общем случае, математическая модель должна учитывать перенос влаги с применением уравнений влагоденоса [42, 73, 74] или включать в расчёт потенциал влажности [31, 41, 54, 75-77]. Данные математические модели используются для стационарного и нестационарного влажностного режимов эксплуатации [7, 68, 69, 74, 76, 78, 80-92]. Расчёты стационарного влажностного режима обладают простотой выполнения [5, 28, 76, 80-92], в то время как расчёты нестационарного влажностного режима позволяют учитывать все факторы из-за высокой инерции процессов влагоденоса.

В работах Богословского В.Н. [92] и Ушкова Ф.В. [91] проведено исследование воздействия изменения температурно-влажностного режима и параметров воздушной среды в процессе эксплуатации стеновых конструкций на теплопроводность составляющих их материалов. Анализ охватывает широкий спектр факторов, определяющих динамику теплофизических свойств материалов.

Фокин К.Ф., Кауфман Б.П. и Каммерер И. [28] проводили исследования влияния структурных параметров строительных материалов и основных

физических факторов на их коэффициент теплопроводности. Каммерер И. установил, что размер пор влияет на коэффициент теплопроводности.

Брилинг В. в своей работе [94] предложил физико-математическую модель, описывающую динамику капиллярного всасывания. В то же время, Порхаев А.П. сосредоточился на выводе уравнения, описывающего движение жидкости внутри капилляра. Его исследования показали, что материалы с высокой плотностью демонстрируют низкую способность к капиллярному всасыванию, а материалы, обладающие высокими теплоизоляционными свойствами, также характеризуются плохой впитывающей способностью [41].

Фокиным К.Ф., Франчуком А.У., Брилингом Р.Е. были разработаны методы расчёта влажностного состояния ограждающих конструкций зданий, учитывающие перенос парообразной и жидкой влаги.

Ушков Ф.В. предложил графический метод оценки нестационарного влажностного режима, основанный на построении графика изменения температур и упругостей водяного пара по толщине ограждения, что позволяет определить количество и место расположения конденсированной влаги, но не в полной мере учитывает влияние температуры на сорбционную влагу материала.

Фокин К.Ф. [28, 52] в своих исследованиях показал, что в материале наружной стены происходит неравномерное перераспределение влаги из-за изменения относительной влажности воздуха в порах самого материала.

Гагарин В.Г., Перехоженцев А.Г. [8], Пастушков П.П., Киселев И.Я., Козлов В.В. с помощью численных методов проводили исследования нестационарного влажностного состояния ограждающих конструкций, что позволило спрогнозировать влияние различных факторов на влажностное состояние конструкций и дало возможность установить время достижения конструкцией равновесного состояния.

Учёные Кауфман Б.П., Шильд Е., Франчук А.У., Ильинский В.М., Гнип И.Я., Веялис С.А., Рубашкина Т.И., Давыденко Н.В. [95], Drochytka R. [96], Suchorab Z. [97], Киселев И.Я. [98] предложили свои эмпирические зависимости между коэффициентом теплопроводности и влажностью.

Suchorab Z. [97] провёл ряд экспериментов по исследованию материала при его очень сильном увлажнении, по результатам которого определена зависимость коэффициента теплопроводности от влажности при десорбции материала. Однако при этом не учитывалось разное изменение влажности.

В работе [99] показаны результаты исследования образцов ячеистого бетона разной плотностью с различными влажностями по массе. В результате были найдены значения влажностей, при которых отсутствует образование льда в структуре материала. Результаты показали, что при отрицательных значениях температуры в больших порах материала возможно образование рыхлого льда, что ведёт к понижению значения коэффициента теплопроводности.

Ясин Ю.Д., Брилинг Р.Е., Гагарин В.Г., Елин Н.Н. в своих работах проводили исследование по перемещению незамерзшей влаги в слоях материала стены при отрицательных температурах. Характеристики такой влаги изучали также и зарубежные ученые Халлент Дж., Хаккер П., Жирифалк Л. В результате проведенных исследований было установлено, что температура, при которой происходит замерзания влаги в материале, зависит от их диаметра капилляров.

Гагарин В.Г. [100] разработал методику определения равновесной сорбционной влажности, позволяющая при разных значениях величин температуры получать изотермы сорбции для строительных материалов.

На основании своих исследований Киселев И.Я. [98] предложил математический метод для определения равновесной сорбционной влажности строительных материалов, основанный на учете в расчётах различных видов влаги. Исследования, проведенные Киселевым И.Я., показали, что при низких значениях температуры и относительной влажности в порах материалов может происходить процесс капиллярной конденсации.

На сегодняшний день существуют аналитические, численные и графические методы решения задач, связанных с переувлажнением материалов слоёв ограждающих конструкций [5, 7, 28, 60, 68, 71, 74-76, 85, 91, 101, 102].

Действующие в Российской Федерации строительные нормы, регламентирующие тепловую защиту зданий, оперируют значениями

теплопроводности материалов, установленными для двух эксплуатационных режимов – А и Б. Однако, при этом не принимается во внимание реальный температурно-влажностный режим, складывающийся в ограждающих конструкциях в зависимости от климатических особенностей конкретной местности и условий эксплуатации конкретного здания. Фактически, влажностное состояние ограждающих конструкций может варьироваться в весьма широком диапазоне. Так в работе Гагарина В.Г. [100] показано, что ограждающие конструкции стен часто чрезмерно увлажняются. Результаты исследований Петрова А.С. и Иванцова А. И. [101, 103] показали, что в материалах слоёв наружных стен относительная влажность воздуха в условиях эксплуатации варьируется в диапазоне 20–85 %, который соответствует диапазону формирования сорбционного увлажнения слоёв данных конструкций.

В международной инженерной практике, при решении задач, связанных с оценкой и предсказанием температурно-влажностного состояния различных объектов и систем, широко применяются общепризнанные стандарты. Среди наиболее востребованных можно выделить ряд документов, регламентирующих методики расчетов и моделирования. В частности, стандарты ISO 8301 [104] и ISO 8302 [105] определяют общие принципы и подходы к измерению и анализу теплофизических характеристик материалов и конструкций. Они устанавливают требования к проведению экспериментов и обработке полученных данных, что позволяет обеспечить сопоставимость результатов, полученных в различных лабораториях и исследовательских центрах по всему миру. Стандарт ISO 8990 [106] фокусируется на вопросах тепловой изоляции и энергоэффективности зданий и сооружений. Он содержит рекомендации по выбору и применению изоляционных материалов, а также методики расчета тепловых потерь через ограждающие конструкции. В свою очередь, ISO 10456 [107] устанавливает правила определения расчетных значений теплофизических свойств строительных материалов и изделий. Этот стандарт является основой для проведения теплотехнических расчетов при проектировании зданий и сооружений. Наконец, ISO 13788 [108] посвящен оценке гигротермических характеристик строительных компонентов и

элементов зданий. Он содержит методики прогнозирования влагонакопления и высыхания материалов, что позволяет предотвратить возникновение конденсата и развитие плесени, обеспечивая долговечность и комфорт эксплуатации зданий. Использование этих стандартов гарантирует надежность и точность прогнозов.

В связи с этим, первостепенное значение приобретают научные исследования, нацеленные на совершенствование методики определения теплотехнических характеристик ограждающих конструкций. Ключевым аспектом является учет фактического влажностного состояния материалов, а также точное определение их теплопроводности в реальных условиях эксплуатации, что требует дополнительных исследований.

1.3.2 Стационарные методы расчёта влажностного режима ограждающих конструкций

При расчётах ограждающих конструкций широко используются упрощённые методики, не требующие применения сложного вычислительного оборудования. Эти подходы, зачастую именуемые инженерными, позволяют специалистам проводить необходимые вычисления с применением базовых математических операций и справочных таблиц. Они применяются только для проектирования тепловлагопереноса в многослойных конструкциях при стационарных условиях.

Мачинский В.Д. первым предложил в ограждающих конструкциях учитывать влажностный режим [51]. В своих исследованиях учёный показал, что внутри ограждающей конструкции из-за разности парциальных давлений внутри и снаружи происходит перенос водяного пара, что влияет на теплоизоляционные характеристики материалов слоев стены.

Более детальное описание процесса увлажнения ограждающих конструкций можно найти в исследовании, проведенном Борщевским А.Н. [109]. В его работе подробно рассматриваются механизмы проникновения влаги в различные материалы, используемые в строительстве, такие как кирпич, бетон, дерево и изоляционные материалы. Борщевский А.Н. анализирует факторы, влияющие на

интенсивность увлажнения, включая пористость материала, его гигроскопичность, а также внешние условия, такие как температура, влажность окружающей среды и наличие осадков.

В 1935 году Фокиным К.Ф. был предложен подход к расчёту ограждающих конструкций [52]. Суть его метода заключалась в анализе движения водяного пара внутри материалов, составляющих ограждающую конструкцию. Метод Фокина К.Ф. позволяет определить потенциальную зону конденсации влаги внутри конструкции. Для этого производится детальный расчёт температурного режима по всему сечению ограждения. Параллельно вычисляется распределение максимальной и линейной упругости водяного пара, что позволяет установить, в каких участках конструкции возможно образование конденсата. На основе полученных данных делается вывод о долгосрочном поведении ограждающей конструкции: будет ли она со временем терять влагу и высыхать, либо, напротив, накапливать её и увлажняться. Несмотря на прошедшее время, метод Фокина, благодаря своей относительной простоте и эффективности, не утратил актуальности. Его модификации широко используются как в России, так и за рубежом, свидетельствуя о его фундаментальном значении для строительной науки и практики. Позже, работы Фокина К.Ф. [52] позволили исследователям прогнозировать влажностный режим ограждений при стационарном режиме эксплуатации.

Ушков Ф.В. разработал подход к выявлению потенциальных мест и степени конденсации водяного пара в многослойных конструкциях ограждающего типа [91]. Его метод, основанный на принципе фокусов, представляет собой удобный инструмент для определения критических зон, где наиболее вероятно образование конденсата. Метод позволяет выявлять слои конструкции, наиболее подверженные риску накопления влаги, а также оценивать интенсивность этого процесса, что в свою очередь, способствует принятию обоснованных решений по влагозащите и долговечности строительных конструкций.

В области анализа тепловлажностного режима ограждающих конструкций, значительный вклад внес Ильинский В.М. [55], предложивший методику,

позволяющую не только оценить степень увлажнения материалов, но и вычислять необходимое сопротивление паропрооницанию и спрогнозировать распределение влажности по толщине стены.

Шкловер А.М. в своей работе [110] предложил подход к определению расчётной температуры наружного воздуха, учитывающий тепловую инерцию ограждающих конструкций. Суть метода заключается в том, что расчётная температура определяется не как мгновенное значение, а как некоторая усреднённая величина, учитывающая теплоаккумулирующую способность материала. Это позволяет сгладить пиковые значения температуры и более точно определить момент и место образования конденсата.

Метод теплотехнического расчета ограждающих конструкций, первоначально разработанный Поликановым М.В. [111] на основе предельных градиентов, представляет собой эффективный инструмент для проектирования теплозащитных и пароизоляционных слоев. Целью данного метода является обеспечение отсутствия конденсационной влаги внутри ограждающей конструкции. В дальнейшем, этот метод получил существенное развитие в работах Перехоженцева А.Г. [19], который адаптировал его для целей нормирования влажностного режима ограждающих конструкций.

В работе Вытчикова Ю.С. и Белякова И.Г. [112] представлен подход к моделированию влажностного поведения ограждающих конструкций. Авторы предлагают использовать безразмерные параметры для анализа и прогнозирования распределения влаги, что позволяет точно определять место образования конденсата в многослойных системах.

В отличие от упрощенных подходов, Козловым В.В. [75] предложен развернутый метод, позволяющий установить параметры зоны конденсации в ограждающей конструкции, принимая во внимание не только теплофизические характеристики, но и влагопроводность составляющих ее материалов. Этот метод представляет собой более комплексный анализ, учитывающий влияние переноса влаги на процессы конденсации.

В исследовании, проведенном Ивановым В.В. [113], акцент был сделан на изучение стационарных процессов теплопереноса в условиях зимнего периода. В рамках работы были выполнены экспериментальные исследования тепловых режимов, характерных для фрагмента наружной стены. Полученные данные включали в себя значения температур, зафиксированные в ключевых точках исследуемого объекта, а также величины плотности теплового потока, проходящего через эти точки. Эти результаты позволили получить детальное представление о распределении тепла в структуре стены и оценить ее теплотехнические характеристики в реальных условиях эксплуатации.

Андреев Д.А., Могутов В.А. и Цирлин А.Н. в своих исследованиях [114] по недопущению образования конденсата внутри ограждающей конструкции предложили способ, который базируется на строгом анализе температурно-влажностного режима внутри конструкции, учитывая климатические особенности региона эксплуатации, характеристики используемых материалов и другие факторы, влияющие на процесс конденсации. Данный метод заключается в том, чтобы определить такое расположение слоев, при котором температура в любой точке конструкции всегда превышала бы точку росы, тем самым исключая возможность образования конденсата. В рамках данного подхода рассматриваются различные варианты компоновки слоев, для каждого из которых проводится детальное моделирование температурно-влажностного режима. На основе результатов моделирования оценивается риск образования конденсата для каждого варианта, и выбирается тот вариант, который обеспечивает наибольшую устойчивость к конденсации.

Параллельно с работами Фокина К.Ф., в первой половине XX века стационарные методы расчёта получили развитие и в Северной Америке, где были выполнены исследования, направленные на определение паропроницаемости строительных материалов. В основе этих исследований также лежал стационарный метод, позволяющий получать данные в условиях установившегося режима.

Аналогичный подход к расчету, предложенный Фокиным К.Ф., нашел свое отражение и в зарубежной практике. В частности, в конце 1950-х годов в

Федеративной Республике Германия Glaser'ом Н. был разработан метод [115], во многом перекликающийся с идеями Фокина. Этот метод лег в основу международного стандарта ISO 13788, регулирующего вопросы, связанные с расчетом влажностного режима ограждающих конструкций.

В трудах Богословского В.Н. разработан подход к оценке влажностного режима ограждающих конструкций, базирующийся на понятии экспериментального потенциала влажности [54]. Суть предложенного метода заключается в использовании стационарной модели переноса влаги, где движущей силой выступает разность потенциалов влажности, существующая между наружной и внутренней поверхностями ограждения. В отличие от традиционных подходов, акцентирующих внимание на парциальном давлении водяного пара, метод Богословского оперирует с интегральной характеристикой – потенциалом влажности, учитывающим совокупное влияние различных факторов, определяющих состояние влаги в материале.

Гагарин В.Г. и Козлов В.В. предложили расчетный метод [66], основанный на применении функции потенциала, отражающей совокупный процесс переноса влаги в парообразной и жидкой фазах. Внедрение данного потенциала позволило значительно упростить математическое описание влагопереноса, что дало возможность получить аналитическое решение и оценить влагонакопление внутри конструкции. В дальнейшем метод был усовершенствован Козловым В.В. с учетом влияния фильтрации влажного воздуха через ограждающие элементы [75], позволяющим более точно моделировать процессы влагопереноса в реальных условиях эксплуатации зданий.

Вышеупомянутые методы анализа влажностного состояния строительных конструкций основаны на стационарности процессов тепло- и влагопереноса. Из-за их простоты, эти методы востребованны на практике. Тем не менее, следует учитывать, что такой подход носит приближенный характер, поскольку игнорирует динамику изменений во времени. В строительных материалах процессы влагопереноса протекают достаточно медленно, а параметры окружающей среды, такие как температура и влажность, подвержены постоянным колебаниям. Более

того, характеристики влагопереноса демонстрируют нелинейное поведение. Вследствие совокупности этих факторов, достижение стационарного влажностного режима в конструкциях зданий становится маловероятным. Это приводит к тому, что результаты расчетов, основанных на моделях стационарного влагопереноса, могут содержать существенные погрешности. В связи с этим, для более точного и надежного прогнозирования влажностного состояния строительных конструкций рекомендуется использовать методы, основанные на моделях нестационарного влагопереноса. Такие модели позволяют учесть динамику изменений температурно-влажностных условий и нелинейность характеристик материалов, что обеспечивает более адекватное отражение реальных процессов, происходящих в конструкциях.

В трудах Мачинского В.Д. была подвергнута критике методология расчёта стационарного влажностного режима ограждающих конструкций [51]. Учёный аргументировал свою позицию тем, что реальные условия эксплуатации зданий и сооружений характеризуются динамическими, нестационарными колебаниями температуры и влажности окружающей среды. Эти переменные факторы оказывают непрерывное воздействие на ограждающие конструкции, препятствуя установлению устойчивого, стационарного влажностного состояния внутри них.

В настоящее время, применяются различные модификации стационарного метода расчёта, в первую очередь, для использования в нормативных документах [39].

По этой причине, более корректно применять нестационарные методы расчёта ограждающих конструкций.

1.3.3 Нестационарные методы расчета влажностного режима ограждающих конструкций

Развитие вычислительной техники и программного обеспечения способствовали развитию нестационарных методов расчёта тепловлагопереноса ограждающих конструкций.

Эпштейн А.С. впервые предложил метод расчёта нестационарного влажностного режима [116] при помощи конечно-разностной аппроксимации по явной схеме. Явная схема аппроксимации предполагала вычисление значений влажности в последующие моменты времени на основе известных значений в предыдущие моменты. Это упрощало вычислительную процедуру, однако накладывало ограничения на величину шага по времени, определяемого условием устойчивости. Из-за сложности расчёта метод Эпштейна А. С. имеет ограниченное практическое применение.

Впоследствии, опираясь на работы Эпштейна А.С., Фокин К.Ф. смог усовершенствовать его метод, устранив существовавшие недостатки. Результатом стало создание метода расчета нестационарного последовательного влажностного режима наружных ограждений, подробно описанного в работе [28]. Для этого Фокин К.Ф. использовал метод конечных разностей по явной схеме. При расчёте ограждение разбивалось на расчётные слои толщиной пропорциональной $\sqrt{p_s}$ с помощью графического способа Власова О.Е [117].

В дальнейшем, К.Ф. Фокин внес значительные улучшения в предложенную методику [52], основанную на методе последовательного увлажнения [93], что предусматривает для каждого временного периода эксплуатации наложения ограничений на каждый временной шаг. При этом относительная паропроницаемость принимается функцией от влажности материала.

Лыков А.В., стремясь к комплексному пониманию процессов влагопереноса в ограждающих конструкциях, использовал математический аппарат, разработанный в рамках теории сушки [41, 53], что оказало большое влияние на все последующие работы в данной области. Основная цель теории сушки является разработка методов расчёта длительности сушки различных материалов. Она помогает рассчитать, сколько тепла потребуется для испарения влаги и нагрева самого материала и определить оптимальный режим сушки, учитывая, что свойства материала меняются по мере удаления влаги. Лыков А.В. использовал в своих

исследованиях понятие потенциала влагопереноса и открыл понятие термовлагопроводности.

Модели, базирующиеся на теории влагопроводности, представляют собой ценный инструмент для анализа переноса влаги, поскольку не требуют детального знания фундаментальных физических механизмов, лежащих в его основе. Благодаря этому качеству, они получили широкое распространение в различных областях, включая теорию сушки [41], где используются для оптимизации процессов удаления влаги из материалов. В строительной отрасли такие модели применяются для прогнозирования и управления массопереносом в конструкциях [53], что позволяет обеспечивать их долговечность и надежность. В физике почв [118] они используются для изучения движения влаги в грунте, что важно для сельского хозяйства и охраны окружающей среды. Из-за сложности вычисления коэффициентов влагопереноса данные модели не нашли широкого применения на практике. Для преодоления этого ограничения необходимы дальнейшие исследования, направленные на разработку более точных и удобных методов определения коэффициентов влагопереноса.

В международном научном сообществе, концепции, базирующиеся на теории влагопроводности, нашли свое применение в работах ряда выдающихся исследователей. В частности, Kohonen R. и Maatta J. [119] использовали эти модели для анализа и прогнозирования влажностных режимов в различных строительных конструкциях и материалах. Их исследования позволили углубить понимание процессов переноса влаги и разработать более эффективные методы контроля влажности. Gawin D. и Klemm P. [120] также внесли значительный вклад в развитие данной области, применив модели влагопроводности для изучения поведения пористых сред в условиях переменной влажности. Их работы помогли лучше понять механизмы сорбции и десорбции влаги, что имеет важное значение для проектирования долговечных и устойчивых к воздействию влаги материалов. Кроме того, Rode C. [121] активно применял теоретические основы влагопроводности для разработки инновационных решений в области строительной физики. Его исследования сосредоточены на создании

энергоэффективных и экологически безопасных зданий, в которых управление влажностью играет ключевую роль. Использование моделей влагопроводности позволило ему оптимизировать параметры вентиляции и теплоизоляции, что привело к снижению энергопотребления и повышению комфорта проживания. В целом, работы этих ученых демонстрируют значимость теории влагопроводности для решения широкого круга задач в строительстве и материаловедении.

Опираясь на фундаментальные принципы теории сушки, а также на работы таких исследователей, как Власов О.Е. и Брилинг Р.Е., Франчук А.У. [29] предложил инновационный подход к моделированию процессов влагопереноса. В своих исследованиях, подкрепленных как экспериментальными данными, так и теоретическими выкладками, Франчук А.У. разработал методики, позволяющие учитывать изменение коэффициентов влагопереноса материалов в зависимости от их влагосодержания и температуры. Несмотря на перспективность предложенных подходов, ограниченность и трудности в получении надежных экспериментальных данных существенно препятствовали их широкому внедрению в практическую деятельность. Осознавая это, ученики Франчука А.У., а именно Лукьянов В.И. [73] и Ясин Ю.Д. [122], продолжили работу по совершенствованию и упрощению предложенных им методов, стремясь сделать их более доступными и удобными для инженерных расчетов. Их вклад позволил расширить область применения методов Франчука А.У. и повысить их практическую значимость.

Лукьянов В.И. разработал уравнение влагопереноса, учитывающее множество факторов, влияющих на нестационарный влагоперенос. Впоследствии, Лукьянов В.И. значительно улучшил свою первоначальную модель, разработав более сложный и детализированный многофакторный метод. Этот метод учитывает широкий спектр факторов, оказывающих влияние на тепловлажностный режим ограждающих конструкций. Благодаря этому, он позволяет с высокой точностью определять распределение влажности в критических зонах, таких как стыковые соединения и вентилируемые прослойки. Несмотря на свою теоретическую ценность и точность, практическое применение этой усовершенствованной модели сопряжено с определенными трудностями. Главная проблема заключается в

необходимости проведения большого количества трудоемких и дорогостоящих экспериментов для определения всех необходимых характеристик тепловлагопереноса. Это существенно ограничивает широкое использование данного метода.

В исследовании Гагарина В.Г. [5] разработан универсальный подход к описанию процесса капиллярного всасывания влаги строительными материалами. В основе предложенной модели лежат фундаментальные принципы гидродинамики, описывающие движение жидкости в капиллярно-пористой среде. В результате проведенного анализа было сформулировано общее уравнение, позволяющее прогнозировать динамику увлажнения строительных материалов под действием капиллярных сил. Уравнение учитывает широкий спектр параметров, влияющих на процесс влагопереноса, таких как пористость, проницаемость, поверхностное натяжение жидкости и угол смачивания.

Ясин Ю.Д. предложил метод определения равновесной влажности на основе равенства капиллярных давлений [122], позволяющий определять равновесную влажность образцов строительных материалов в лабораторных и натуральных условиях. Метод Ясина Ю.Д. основан на идее достижения термодинамического равновесия влаги в порах материала при различных температурах и влагосодержаниях.

Перехоженцев А.Г. в своей работе [7] доказал, что у строительных материалов ограждающей конструкции, которые соприкасаются, влагосодержание в области их увлажнения связаны между собой линейной зависимостью.

В начале 1950-х годов Богословским В.Н. был предложен концептуально новый подход к анализу влагопереноса, основанный на введении понятия потенциала влажности [30, 54]. Это понятие позволило объединить различные составляющие потока влаги в единую характеристику, упростив тем самым математическое описание процесса. Ключевым преимуществом использования потенциала влажности является возможность формулировки простого условия равновесного распределения влаги между различными материалами, находящимися в контакте. Согласно этому условию, в точке соприкосновения

потенциалы влажности обоих материалов должны быть равны. Использование потенциала влажности существенно упрощает математическое моделирование нестационарного влагопереноса в многослойных конструкциях, подверженных воздействию неизотермических условий. Это особенно важно при анализе поведения строительных материалов и конструкций, где влажность может существенно влиять на их теплофизические свойства и долговечность. Данный подход позволяет описывать влагоперенос во всем диапазоне влажности, от абсолютно сухого состояния до насыщенного. Несмотря на теоретическую простоту и практическую значимость, применение потенциала влажности сталкивается с определенными трудностями. Основная проблема заключается в необходимости экспериментального определения характеристик материалов, необходимых для расчета потенциала влажности. Точное измерение этих характеристик требует специализированного оборудования и квалифицированного персонала.

В исследовании, представленном Лыковым А.В. в труде [41], была предложена концептуальная модель, рассматривающая процессы переноса влаги в условиях стабильного внешнего давления. Ключевым аспектом данной модели является описание всех форм влагопереноса через призму градиентов двух фундаментальных параметров: изотермического потенциала влагопереноса и температуры. Основным достоинством подхода Лыкова является введение понятия потенциала влагопереноса, что значительно упрощает формулировку граничных условий, особенно в ситуациях, когда рассматриваются сложные конструкции, состоящие из разнородных материалов. Однако, предложенная модель не лишена недостатков. Введение потенциала влагопереноса приводит к усложнению уравнения влагопереноса за счет добавления слагаемого, описывающего термовлагопроводность, что затрудняет вычислительные действия, связанных с решением модифицированного уравнения влагопереноса.

Перехоженцев А.Г. [7, 8] предложил математическую модель влагопереноса и разработал шкалу относительного изотермического потенциала влагопереноса. На основании его модели была разработана компьютерная программа расчёта

двухмерных нестационарных температурно-влажностных полей участков ограждающих конструкций.

Гагарин В.Г. [66] разработал методику учета влияния влажности материалов слоёв ограждающих конструкций, в основе которой лежит экспериментальное определение их теплотехнических характеристик. Для проведения расчетов была разработана специализированная компьютерная программа. Она объединяет модели, описывающие одномерный нестационарный влагоперенос и теплопроводность материала. Это методика позволила получить более точную картину распределения влажности в ограждающих конструкциях и, соответственно, более корректно оценить их теплотехнические характеристики.

Фоломин А.И. [123] разработал компьютерную программу расчёта влажностного режима Минск-22, которая многие годы применялась в ЦНИИЭПжилица. Такая программа имела недостатки, так как учитывала перемещение только парообразной влаги, что могло привести к завышенным значениям влажности материалов конструкций. Эту программу не модернизировали под современное программное обеспечение, поэтому она была утеряна.

Лукьянов В.И. [124] впервые использовал ЭВМ для расчёта нестационарного влажностного режима. Со временем он усовершенствовал свой компьютерный комплекс [72]. Эта программа основывается на математической модели влагопереноса Лыкова А.В., которая учитывает отдельный влагоперенос.

Александровский С.В. разработал прикладную теорию теплопроводности, учитывающую гидратационные стоки влаги [125].

Нестационарные методы расчёта также представлены и в иностранных источниках [126-129].

В современном мире появилось множество программных комплексов для расчёта влажностного режима ограждающих конструкций, которые помогают реализовать сложные математические модели.

В научных исследованиях, посвященных анализу тепло- и влагопереноса в строительных конструкциях, особое место занимает работа Корниенко С.В. [83,

84], где предложен научный подход к расчету температурно-влажностного режима, базирующийся на использовании новой шкалы абсолютного потенциала влажности, позволяющей более точно моделировать процессы, происходящие в трехмерных областях ограждающих конструкций [84]. Суть предложенного метода заключается в математическом описании процесса тепло- и влагопереноса через систему дифференциальных уравнений в частных производных второго порядка. Характерной особенностью данной системы является ее параболический тип и наличие переменных коэффициентов, что отражает сложный и динамичный характер рассматриваемых явлений. Учет переменности коэффициентов позволяет более адекватно учитывать влияние различных факторов, таких как изменение температуры, влажности и свойств материалов, на процесс переноса тепла и влаги. Указанная математическая модель Корниенко С.В. реализована в компьютерной программе «Совместный влаготеплоперенос СОВТ-3». Разработанная модель и соответствующее программное обеспечение предлагают ряд значительных преимуществ в области анализа тепловлажностного режима строительных конструкций. Во-первых, использование новой шкалы абсолютного потенциала влажности позволяет существенно упростить математическое описание процессов переноса тепла и влаги, а также расширить диапазон применимости расчетов, охватывая материалы с различной степенью влажности. Во-вторых, программа позволяет детально изучать динамику изменения температуры и влажности в ограждающих конструкциях сложной формы, учитывая переменные климатические и микроклиматические условия. В-третьих, модель способна анализировать тепловые и влажностные процессы с различной интенсивностью, что делает ее универсальным инструментом для решения широкого спектра задач. Наконец, наличие функции задания неравномерной сетки в пространстве и времени позволяет оптимизировать вычислительный процесс, сокращая время расчетов и повышая их точность.

Проведенное Корниенко С.В. математическое моделирование нестационарных процессов тепло- и влагопереноса в ограждающих конструкциях

показало локализацию температуры и влагосодержания в краевых зонах этих конструкций [83].

В мировой строительной практике расчет температурно-влажностного режима ограждающих конструкций стал неотъемлемой частью решения практических задач теплофизики зданий. Это позволяет проектировать более долговечные и комфортные здания. Однако, несмотря на широкое применение существующих методов, единой, всеобъемлющей теории, описывающей процессы влагопереноса в строительных материалах, пока не существует. Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод, что разработка теории и методов расчета температурно-влажностного режима ограждающих конструкций актуальна и перспективна.

1.4 Пакеты программ для моделирования процессов тепловлагопереноса

Для моделирования процессов тепловлагопереноса в ограждающих конструкциях используются ряд пакетов программ, среди которых следует выделить ANSYS [130], NASTRAN [131], МОДЭН, COMSOL Multiphysics [132].

Вычислительный комплекс ANSYS имеет несколько модулей стационарных и нестационарных тепловых расчетов для 2D и 3D геометрических моделей. Эти модули позволяют учитывать различные механизмы теплопередачи, такие как теплопроводность, конвекция и излучение. Для теплопроводности ANSYS предлагает широкий выбор моделей материалов с различными теплофизическими свойствами, включая анизотропные материалы. Конвективный теплообмен может быть смоделирован как с использованием заданных коэффициентов теплоотдачи, так и путем решения уравнений гидродинамики для определения распределения скорости и температуры в потоке жидкости или газа.

С помощью NASTRAN могут решаться задачи моделирования систем тепловлагопереноса в ограждающих конструкциях. Данный программный комплекс позволяет выявлять слабые места в теплоизоляции и разрабатывать более эффективные решения для снижения тепловпотерь, предотвращать образование

конденсата, прогнозировать поведение конструкции в различных климатических условиях, оценивать эффективность систем вентиляции.

Пакеты программ ANSYS и NASTRAN основаны на методе конечных элементов. Эти программные комплексы позволяют с достаточной точностью прогнозировать тепловые потери в ограждающих конструкциях зданий. ANSYS позволяет импортировать файлы в NASTRAN.

Программа имитационного моделирования энергетических систем МОДЭН использует стандартную базу материалов и нормы Белоруссии. Она находит широкое применение в системах отопления, вентиляции и кондиционирования.

COMSOL Multiphysics – это пакет функций и средств, которые представляют собой платформу для моделирования конструкций, физико-математических процессов во всех областях проектирования, исследования и производства. Данная программа состоит из разных модулей и инструментов, позволяющие смоделировать объект с учётом геометрии и конкретных свойств материалов. Через среду графического программирования Simulink компании MATLAB с помощью набора блоков и связей есть возможность внедрить в COMSOL Multiphysics определенные математические соотношения и зависимости.

Выводы по первому разделу, цель и задачи исследования

На основе выполненного анализа показано, что основным направлением повышения эффективности систем отопления жилых зданий массовой застройки является 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. В настоящее время практически отсутствуют результаты исследований по влиянию

на коэффициенты теплопроводности и влагопроводимости теплоизоляционных материалов изменения влажности в процессе эксплуатации.

Требуют развития методики и программные средства для имитационного моделирования процессов тепловлагоденоса в многослойных ограждающих конструкциях жилых зданий.

В этой связи повышение эффективности систем отопления 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.

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

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи:

- 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 влагопроводности 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.

РАЗДЕЛ 2

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЕПЛОВЛАГОПЕРЕНОСА В ЧЕТЫРЕХСЛОЙНОЙ ОГРАЖДАЮЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ

Жилые здания и здания гражданского назначения, построенные во времена СССР на территории г. Луганска и Луганской области, были возведены по типовым проектам, согласно действующим на тот момент нормам проектирования. Сегодня, повысились требования по тепловой защите этих зданий, что привело к необходимости утепления таких построек. Особенно, это актуально для зданий массовых застроек. Конструкции существующих зданий массовой застройки со слоем утеплителя представляют собой четырехслойные конструктивные схемы.

Исходя из этого, уже сейчас необходимы теоретические разработки и обоснования по оптимизации технологий обеспечения комфортного теплового режима в помещениях данной категории зданий.

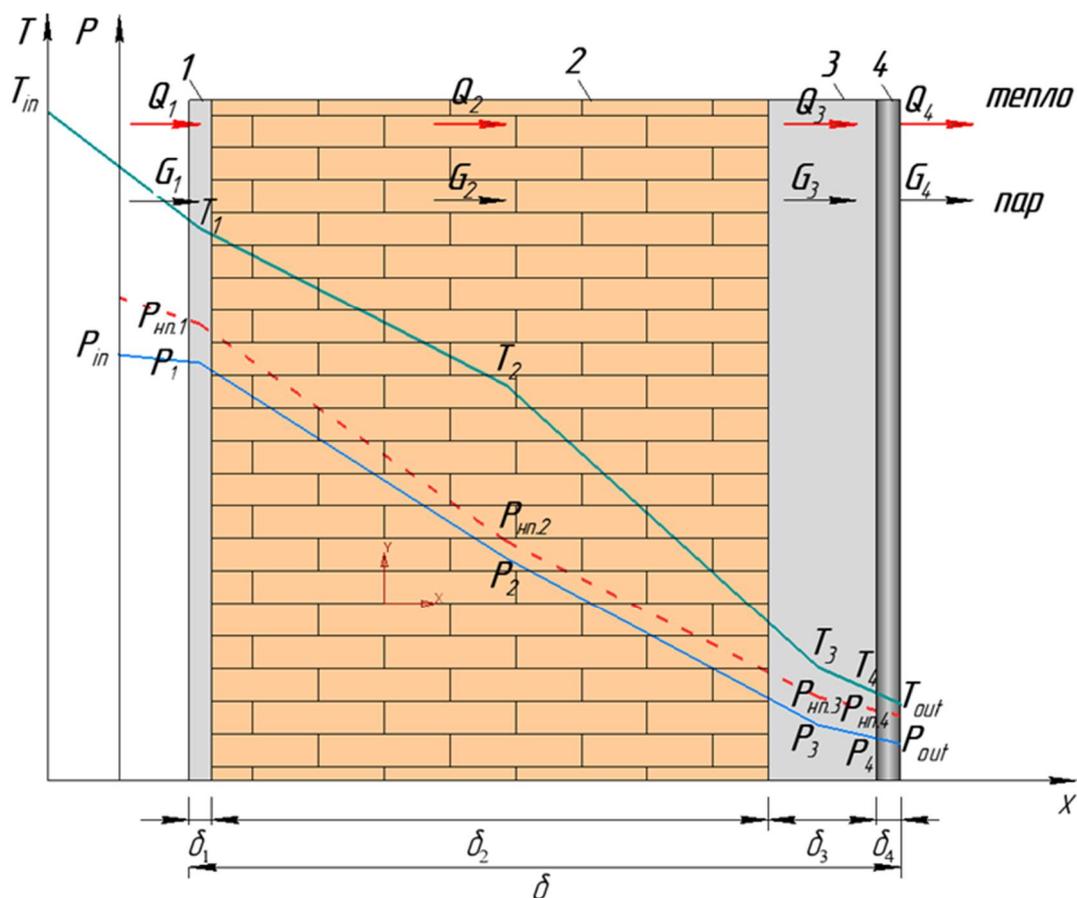
Для увеличения энергосбережения существующих зданий важно учитывать особенности теплообмена в конструктивных элементах зданий, особенно в условиях изменяющейся внешней среды. Анализ свойств паровоздушной среды, выявление зон возможной конденсации и обледенения, а также грамотный подбор теплоизоляционных материалов помогут предотвратить появление сырости и плесени. Это не только продлит срок эксплуатации зданий, но и обеспечит комфортный микроклимат внутри помещений, что в итоге снизит затраты на обслуживание и эксплуатацию.

2.1 Расчётная схема четырехслойной ограждающей конструкции

Наружную стену типового жилого здания массовой застройки можно представить четырехслойной ограждающей конструкцией, расчётная схема

которой приведена на рисунке 2.1. 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 $\delta = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \delta_4$.

На расчётной схеме показаны такие параметры: T_{in} – температура внутри помещения; T_{out} – температура наружного воздуха; T_i – температура в i -том слое; Q_i – тепловой поток в i -том слое ограждающей конструкции; G_i – поток водяного пара в i -том слое ограждающей конструкции; P_i – парциальное давление в i -том слое; P_{in} – парциальное давление внутри помещения; P_{out} – парциальное давление наружного воздуха; $P_{нн.i}$ – давления насыщенных паров в i -том слое. Вместо Q_i можно рассматривать плотность теплового потока $q_i = Q_i / A$, где A – площадь изотермической поверхности (рисунок 2.2).



- 1 – штукатурный слой известковой штукатурки, 2 – кирпичная стена (керамзитобетонная),
3 – утеплитель, 4 – облицовочный слой (штукатурка)

Рисунок 2.1 – Схема ограждающей конструкции

Основными параметрами наружного воздуха являются температура T_{out} и относительная влажность φ_{out} , которые являются исходными данными и принимаются для г. Луганска как среднемесячные величины согласно действующих норм.

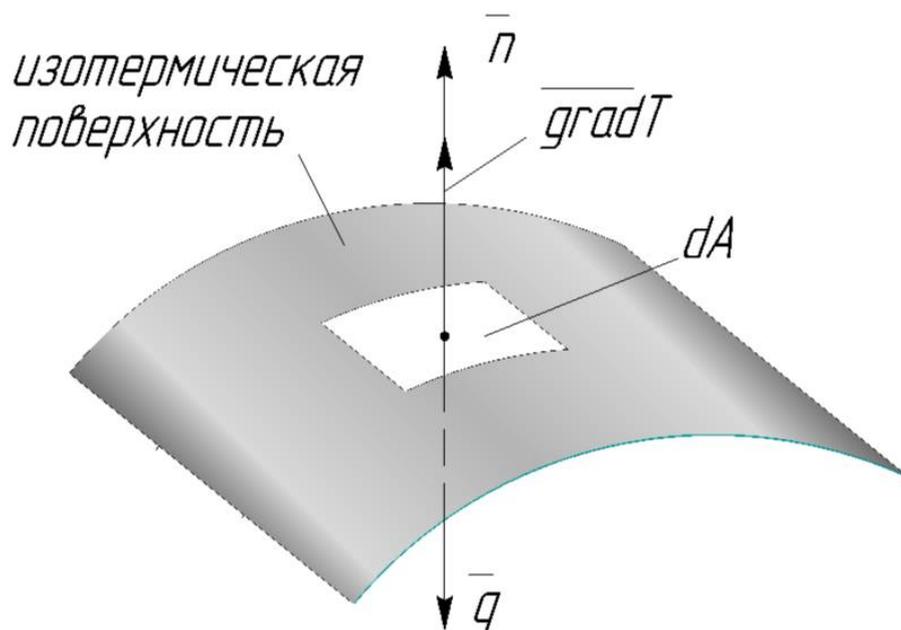


Рисунок 2.2 – Изотермическая поверхность

2.2 Математическое описание основных процессов тепловлагопереноса в ограждающих конструкциях

Тепловлагоперенос в наружных ограждающих конструкциях является сложным физическим процессом, включающий в себя перенос теплоты, диффузию водяного пара и перенос капельной жидкости. Перенос теплоты в общем случае осуществляется тремя физически разными способами [30, 53, 133]: теплопроводность, конвекция и лучистый теплообмен.

Теплопроводность – это процесс передачи тепловой энергии внутри тела или между телами, находящимися в непосредственном контакте. Этот процесс обусловлен микроскопическим движением частиц, составляющих вещество – атомов и молекул. Более горячие частицы, обладающие большей кинетической энергией, сталкиваются с менее горячими, передавая им часть своей энергии. В

результате происходит выравнивание температуры внутри тела или между контактирующими телами. Теплопроводность наиболее эффективна в твердых телах, где частицы расположены близко друг к другу и могут легко обмениваться энергией.

Конвекция – это перенос теплоты с помощью движущейся жидкости или газа. В этом процессе нагретая жидкость или газ становится менее плотным и поднимается вверх, уступая место более холодной среде. Возникает циркуляционный поток, который переносит тепло от нагретой поверхности к более холодным областям. Конвекция является эффективным способом передачи тепла в жидкостях и газах, особенно при наличии больших разностей температур.

Лучистый теплообмен (излучение) – это передача теплоты посредством электромагнитных волн, таких как инфракрасное излучение. В отличие от теплопроводности и конвекции, лучистый теплообмен не требует наличия промежуточной среды и может происходить в вакууме. Все тела излучают электромагнитные волны, интенсивность которых зависит от температуры тела. При поглощении этих волн другим телом происходит его нагрев.

В природе в чистом виде наиболее часто встречается теплопроводность, особенно в сплошных твердых телах, где движение частиц ограничено и конвекция или излучение не играют существенной роли. Однако в большинстве реальных ситуаций эти три механизма действуют одновременно, определяя общую картину теплопередачи.

Для распространения теплоты в любом теле необходимо наличие разности температур в различных точках тела.

Теплота, передаваемая теплопроводностью, описывается законом Фурье, согласно которому плотность теплового потока q пропорциональна градиенту температуры T (рисунок 2.2) [41]

$$q = -\lambda \text{grad} T. \quad (2.1)$$

Знак минус показывает, что тепловой поток направлен в сторону уменьшения температуры, а градиент температуры является отрицательной величиной.

На основании закона Фурье (2.1) дифференциальное уравнение теплопроводности с учётом переменной величины коэффициента теплопроводности имеет вид [133]

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (2.2)$$

где x, y, z – декартова система координат;

c – теплоемкость материала;

ρ – плотность материала слоя;

$T(x, y, z, t)$ – температура, зависящая от координат и времени отсчета.

Для одномерной задачи температура одинаково распространяется по всей поверхности ограждающей конструкции. Тогда

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) = 0, \quad \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0. \quad (2.3)$$

Уравнение теплопроводности записывается в виде [29, 132]

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right). \quad (2.4)$$

На внутренней поверхности наружной ограждающей конструкции, а также на внешней границе необходимо рассматривать процессы конвективного теплообмена, при котором совместно протекают процессы конвекции и теплопроводности.

Конвекция, или конвективная теплоотдача, играет ключевую роль в передаче тепла между поверхностями ограждения и окружающим воздухом. Для математического описания этого явления используется закон Ньютона-Рихмана [30], согласно которому плотность теплового потока q пропорциональна разности температур на слоях ограждающей конструкции

$$q = \alpha_k (T_n - T_в), \quad (2.5)$$

где α_k – коэффициент теплоотдачи конвекцией;

T_n – температура на поверхности ограждающей конструкции;

$T_в$ – температура воздуха.

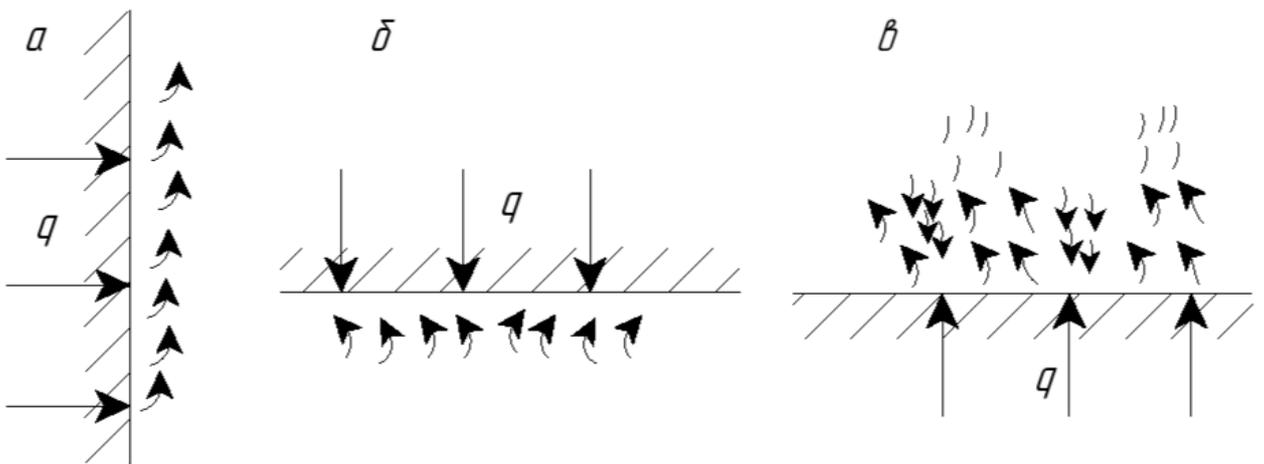


Рисунок 2.3 – Характер движение воздуха при естественной конвекции:

а – при нагреве вертикальной стенки; б – при нагреве горизонтальной стенки сверху; в – при нагреве горизонтальной стенки снизу

Дифференциальное уравнение теплоотдачи, устанавливающее связь между коэффициентом теплоотдачи и температурным полем в воздухе принято записывать в виде

$$\alpha_k = -\frac{\lambda}{(T_n - T_g)} \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_{n=0}. \quad (2.6)$$

Коэффициент теплоотдачи α_k характеризует интенсивность теплообмена между поверхностью тела и воздухом. На величину коэффициента теплоотдачи при конденсации пара влияет направление его движения. Когда пар движется вниз вдоль вертикальной поверхности, это ускоряет стекание конденсатной пленки, делая ее тоньше и, как следствие, повышая коэффициент теплоотдачи. И наоборот, если пар движется в направлении, противоположном движению конденсатной пленки, происходит замедление стекания, увеличение толщины пленки и уменьшение коэффициента теплоотдачи. Таким образом, направление движения пара оказывает существенное воздействие на интенсивность теплопередачи при конденсации.

Особенностью теплоотдачи является формирование так называемого пограничного слоя – тонкого воздушного слоя у поверхности, где преобладает теплопроводность. Толщина этого слоя определяет сопротивление теплопереносу и, следовательно, эффективность теплоотдачи. Влияние пограничного слоя учитывается при расчете коэффициента теплоотдачи, который является ключевым параметром при проектировании теплообменных аппаратов и систем охлаждения.

В подавляющем большинстве случаев твердые и жидкие вещества демонстрируют непрерывный спектр излучения, что означает, что они испускают электромагнитные волны всех длин волн в определенном диапазоне. Как известно, при лучистом теплообмене устанавливается состояние, при котором поток энергии, испускаемый одним телом и поглощаемый другим, в точности компенсируется обратным потоком (рисунок 2.4).

Полный лучистый поток представляет собой суммарную энергию, излучаемую поверхностью объекта во всех диапазонах длин волн за единицу времени. Иными словами, это общее количество энергии, которое тело испускает в

виде электромагнитного излучения в секунду. Эта энергия включает в себя все виды излучения, от инфракрасного до ультрафиолетового и видимого света.

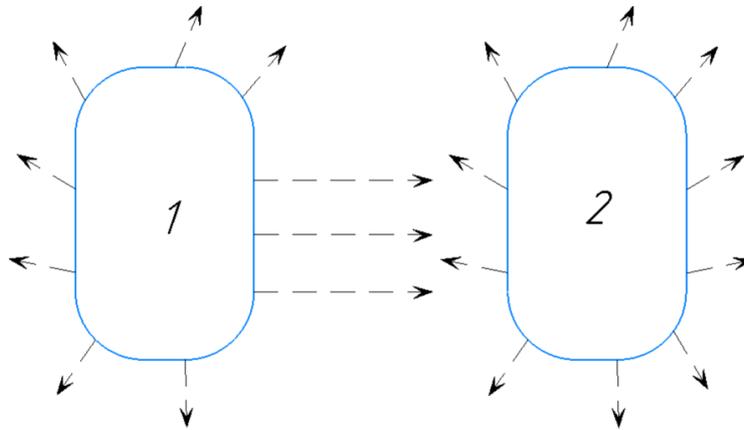


Рисунок 2.4 – Лучистый теплообмен между телами

Законы лучистого теплообмена, изначально разработанные для абсолютно черного тела, базируются на условии термодинамического равновесия, когда все участвующие тела имеют одинаковую температуру. Это означает, что они испускают и поглощают лучистую энергию в равных объемах, поддерживая баланс. Важно отметить, что как интенсивность излучения абсолютно черного тела, так и интенсивность излучения любого реального серого тела зависят от двух ключевых факторов: температуры тела и длины волны излучения. Таким образом, при изучении лучистого теплообмена необходимо учитывать не только свойства идеализированного абсолютно черного тела, но и особенности реальных серых тел, принимая во внимание их температуру и спектральные характеристики излучения.

Как правило, плотность теплового потока при переносе теплоты излучением определяется с помощью соотношения

$$q = \varepsilon c_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4, \quad (2.7)$$

где ε – степень черноты излучаемого тела (коэффициент теплового излучения), характеризующая способностью поглощать и излучать энергию;

c_0 – коэффициент излучения тела.

Степень черноты ε изменяется от 0 до 1 для различных тел в зависимости от вида материала, температуры, состояния поверхности.

Лучистый теплообмен для наружных ограждающих конструкций жилых зданий массовой застройки не является типовым и стабильным фактором влияния, и, кроме того, сокращает потери тепла. Поэтому лучистый теплообмен при рассмотрении процессов тепловлагодпереноса в ограждающих конструкциях, как правило, не учитывают.

С учётом различных физических способов теплопередачи в задачах тепловлагодпереноса ставятся три вида граничных условий: I, II и III рода.

Граничные условия I рода задают распределение температуры на поверхности тела для каждого момента времени. Это наиболее прямолинейный способ определения теплового состояния на границе, когда температура на поверхности известна и может быть представлена как функция координат и времени, то есть $T(x, y, z, t)$. Такие условия обычно применяются в случаях, когда поверхность тела находится в контакте с массивным телом, температура которого известна и поддерживается постоянной, или когда температура поверхности измеряется с высокой точностью.

Граничные условия II рода задают значение теплового потока для каждой точки поверхности тела и любого момента времени. В отличие от условий первого рода, где задается непосредственно температура поверхности, здесь определяется количество тепловой энергии, проходящее через единицу площади поверхности в единицу времени. Математически это выражается через производную температуры по нормали к поверхности, умноженную на коэффициент теплопроводности материала. Таким образом, задается функция $q(x, y, z, t)$, описывающая плотность теплового потока на поверхности тела.

Граничные условия III рода задают температуру окружающей среды и закон теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой. В отличие от граничных условий I рода, где фиксирована температура поверхности, и II рода, где задан тепловой поток, граничные условия III рода описывают взаимодействие

тела с окружающей средой, учитывая температуру этой среды и интенсивность теплообмена.

Эти условия наиболее реалистично отражают многие практические ситуации, когда тело контактирует с жидкостью или газом, имеющим определенную температуру.

Паропроводность аналогично нестационарному режиму теплопередачи определяется паропроницаемостью и сорбцией – десорбцией материала [30, 53, 133].

Поток водяного пара в слое ограждающей конструкции определяется аналогично (2.3) согласно

$$G = -\mu \frac{\partial P}{\partial x}, \quad (2.8)$$

где μ – коэффициент паропроницаемости;

P – парциальное давление.

Если рассматривать элементарный объем фазы, изменения концентрации водяного пара в нём можно записать дифференциальное уравнение в виде

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_n \xi P) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial P}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial P}{\partial z} \right), \quad (2.9)$$

где ρ_n – плотность водяного пара;

ξ – удельная пароемкость материала.

Для одномерной задачи парциальное давление одинаково распространяется по всей поверхности ограждающей конструкции. Тогда

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial P}{\partial y} \right) = 0, \quad \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial P}{\partial z} \right) = 0. \quad (2.10)$$

Дифференциальное уравнение диффузии пара в сорбирующей среде при одномерной задаче имеет вид

$$\xi \rho_n \frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \frac{\partial P}{\partial x} \right]. \quad (2.11)$$

Перенос капельной влаги в слое ограждающей конструкции определяется аналогично (2.3) согласно

$$g = -\beta \frac{\partial W_f}{\partial x}; \quad (2.12)$$

где W_f – капельная влажность;

β – коэффициент влагопроводности.

Если рассматривать элементарный объем фазы, изменения концентрации капельной влаги в нём можно записать дифференциальное уравнение влагопроводности в виде

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho W_f) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\beta \frac{\partial W_f}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\beta \frac{\partial W_f}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\beta \frac{\partial W_f}{\partial z} \right). \quad (2.13)$$

Для одномерной задачи капельная влажность одинаково распространяется по всей поверхности ограждения. Тогда

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\beta \frac{\partial W_f}{\partial y} \right) = 0, \quad \frac{\partial}{\partial z} \left(\beta \frac{\partial W_f}{\partial z} \right) = 0. \quad (2.14)$$

Дифференциальное уравнение влагопроводности в сорбирующей среде при одномерной задаче имеет вид [134]

$$\rho \frac{\partial W_f}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\beta \frac{\partial W_f}{\partial x} \right]. \quad (2.15)$$

Сорбционная влажность материальных слоев ограждающей конструкции зависит от изменения относительной влажности на слое, определяемой значением парциального давления воздуха в порах материала.

Величина парциального давления водяного пара в насыщенном воздухе $P_{н.п.}$ зависит от температуры воздуха T . Парциальное давление с возростанием температуры увеличивается. Для определения парциального давления в условиях повышенных температур применяются два основных подхода. Первый основан на использовании специализированных диаграмм, представляющих собой графические зависимости парциального давления от температуры при различных концентрациях компонентов смеси. Эти диаграммы, как правило, строятся на основе обширных экспериментальных данных и позволяют быстро оценить парциальное давление для заданных условий. Второй подход заключается в применении таблиц с экспериментальными данными, полученными в ходе тщательных исследований. Эти таблицы содержат значения парциального давления для различных температур и концентраций, что позволяет проводить более точные расчеты. Однако, стоит учитывать, что экспериментальные данные могут быть ограничены определенным диапазоном температур и концентраций, что требует осторожности при экстраполяции результатов [135].

Степень насыщенности воздуха водяным паром определяется относительной влажностью φ , %. Этот показатель отражает соотношение между текущим содержанием водяного пара в воздухе и максимально возможным его содержанием при данной температуре

$$\varphi = \frac{P_{in}}{P_{н.п.}}. \quad (2.16)$$

Данные математические модели не учитывают изменения коэффициентов теплопроводности и влагопроводности в зависимости от изменения влажности в процессе эксплуатации.

В работах Франчука А.В. [29] в виде таблиц представлены зависимости коэффициентов теплопроводности и коэффициентов влагопроводности строительных материалов от влажности. Шильд Е. [133] в своей работе приводит таблицы изменения коэффициентов теплопроводности от прироста влажности. В настоящее время на рынке теплоизоляционных материалов появились новые утеплители. 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.

2.3 Математическая модель тепловлагоденоса для ограждающей конструкции с учетом изменения влажности в процессе эксплуатации

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

$$Q_i = -\lambda_i(W_i) \frac{\partial T_i}{\partial x}, \quad (2.17)$$

где W_i – влажность в i -том слое;

$\lambda_i(W_i)$ – коэффициент теплопроводности в i -том слое как функция W_i .

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

$$c_i(W_i) \rho_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_i(W_i) \frac{\partial T_i}{\partial x} \right), \quad (2.18)$$

где $c_i(W_i)$ – теплоемкость материала i -того слоя как функция W_i ;

ρ_i – плотность материала в i -ом слое.

Теплоемкость материала i -того слоя $c_i(W_i)$ от влажности изменяется не значительно. Принимаем её значение постоянным для материала и в работе не проводим её экспериментальные исследования.

Процесс теплопередачи в ограждающих конструкциях здания включает процесс переноса тепла теплопроводностью между слоями, конвекцией с наружной поверхности стенки в окружающую среду. При анализе теплообмена приняты следующие граничные условия [30, 134]:

$$\alpha_{in} (T_{in} - T_1(0)) = -\lambda_1(0) \left. \frac{\partial T_1}{\partial x} \right|_{x=0}; \quad (2.19)$$

$$T_1(\delta_1) = T_2(\delta_1); \quad (2.20)$$

$$T_2(\delta_1 + \delta_2) = T_3(\delta_1 + \delta_2); \quad (2.21)$$

$$T_3(\delta_1 + \delta_2 + \delta_3) = T_4(\delta_1 + \delta_2 + \delta_3); \quad (2.22)$$

$$-\lambda_4(\delta) \left. \frac{\partial T_4}{\partial x} \right|_{x=\delta} = \alpha_{out} (T_4(\delta) - T_{out}), \quad (2.23)$$

где α_{in} и α_{out} – коэффициенты теплоотдачи на внутренней и внешней поверхности ограждающей конструкции.

Коэффициент теплоотдачи характеризует интенсивность теплообмена между наружным воздухом и поверхностью ограждения [133]. Этот коэффициент зависит от многих факторов, но при решении задач теплопроводности его обычно принимают постоянным [136].

Процесс влагопередачи через четырехслойное ограждение здания происходит за счет переноса влаги, находящейся в паровой фазе, – паропроницаемость, и за счет переноса капельной влаги – влагопроводность. Эти процессы идут в материале постоянно как при увлажнении, так и при высыхании. Процесс влагопередачи подчиняется законам диффузии пара и влагопроводности в капиллярно-пористых телах [41]. Процесс влагопередачи через четырехслойное ограждение показан на рисунке 2.1.

Паропроводность аналогично нестационарному режиму теплопередачи определяется переноса водяного пара и сорбцией – десорбцией материала [30, 53, 133].

Для каждого i -того слоя записано уравнение переноса водяного пара

$$G_i = -\mu_i(W_i) \frac{\partial P_i}{\partial x}, \quad (2.24)$$

где $\mu_i(W_i)$ – коэффициент паропроницаемости i -того слоя как функция W_i .

Дифференциальное уравнение диффузии пара в сорбирующей среде для каждого i -того слоя

$$\xi_i(W_i) \rho_n \frac{\partial P_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_i(W_i) \frac{\partial P_i}{\partial x} \right), \quad (2.25)$$

где $\xi_i(W_i)$ – удельная пароемкость материала i -того слоя как функция W_i .

Граничные условия для парциального давления имеют вид:

$$P_1(0) = P_{in}; \quad (2.26)$$

$$P_1(\delta_1) = P_2(\delta_1); \quad (2.27)$$

$$P_2(\delta_1 + \delta_2) = P_3(\delta_1 + \delta_2); \quad (2.28)$$

$$P_3(\delta_1 + \delta_2 + \delta_3) = P_4(\delta_1 + \delta_2 + \delta_3); \quad (2.29)$$

$$P_4(\delta) = P_{out}. \quad (2.30)$$

Коэффициенты $\mu_i(W_i)$ и $\xi_i(W_i)$ i -того слоя от влажности изменяются не значительно. Принимаем эти коэффициенты как постоянные величины и в работе не проводим их экспериментальные исследования.

Для каждого i -того слоя ограждающей конструкции справедливо дифференциальное уравнение влагопроводности

$$\rho_i \frac{\partial W_{fi}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\beta_i(W_i) \frac{W_{fi}}{\partial x} \right), \quad (2.31)$$

где W_{fi} – капельная влажность в i -том слое;

$\beta_i(W_i)$ – коэффициент влагопроводности в i -том слое как функция W_i .

Для каждого i -того слоя ограждающей конструкции запишем уравнение потока капельной влаги

$$g_i = -\beta_i(W_i) \frac{\partial W_{fi}}{\partial x}, \quad (2.32)$$

где g_i – поток капельной влаги в i -том слое.

Граничные условия для влагосодержания имеют вид:

$$W_{f1}(0) = W_{fin}; \quad (2.33)$$

$$W_{f1}(\delta_1) = W_{f2}(\delta_1); \quad (2.34)$$

$$W_{f2}(\delta_1 + \delta_2) = W_{f3}(\delta_1 + \delta_2); \quad (2.35)$$

$$W_{f3}(\delta_1 + \delta_2 + \delta_3) = W_{f4}(\delta_1 + \delta_2 + \delta_3); \quad (2.36)$$

$$W_{f4}(\delta) = W_{fout}, \quad (2.37)$$

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}

$$W_i = W_{si} + W_{fi}. \quad (2.38)$$

Сорбционную влажность принято рассматривать как функцию относительной влажности воздуха

$$W_{si} = f(\varphi_i), \quad (2.39)$$

где $\varphi_i = P_i/P_{nn.i}$ – относительная влажность в i -слое.

Давление насыщенных паров в i -слое

$$P_{nn.i} = 0,0215T_i^3 + 1,70T_i^2 + 48,08T_i + 613. \quad (2.40)$$

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

$$W_i = W_{si} \text{ при } \varphi_i < 1. \quad (2.41)$$

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

Коэффициенты теплопроводности и влагопроводимости теплоизоляционных материалов рассматриваются как функции переменной в процессе эксплуатации сорбционной влажности, что позволяет повысить точность прогнозирования тепловых потерь.

Выводы по второму разделу

На основании проведенных исследований сделаны следующие выводы:

1. Построена расчетная схема четырехслойной ограждающей конструкции, включающей внутренний штукатурный слой, материал стены здания, теплоизоляционный материал и наружный облицовочный слой. В качестве материала стены здания рассматривается кирпичная кладка и керамзитобетонная панель. Данные ограждающие конструкции соответствуют жилым зданиям массовой застройки.

2. Рассмотрены процессы теплопереноса для четырехслойной ограждающей конструкции, которые описаны уравнениями теплопроводности и конвективного теплообмена для каждого из слоев, на внутренней и наружной границе которых поставлены соответствующие граничные и начальные условия. Коэффициент теплопроводности теплоизоляционного материала рассматривается с учетом изменения влажности в процессе эксплуатации.

3. Рассмотрены процессы влагопереноса для четырехслойной ограждающей конструкции, которые описаны уравнениями влагопроводности и диффузии водяного пара для каждого из слоев, на внутренней и наружной границе которых поставлены соответствующие граничные и начальные условия. Коэффициент влагопроводности теплоизоляционного материала рассматривается с учетом изменения влажности в процессе эксплуатации.

4. Разработана математическая модель тепловлагопереноса в четырехслойной ограждающей конструкции, включающей внутренний

штукатурный слой, материал стены здания, теплоизоляционный материал и наружный облицовочный слой. Модель описывает процессы теплопроводности, конвективного теплообмена, влагопроводности и диффузии водяного пара с учетом межслойных и внешних граничных условий. Коэффициенты теплопроводности и влагопроводности теплоизоляционных материалов рассматриваются как функции переменной в процессе эксплуатации сорбционной влажности, что позволило усовершенствовать методы определения теплотехнических характеристик ограждающих конструкций.

5. Материалы исследований по данному разделу опубликованы в работах [136-138].

РАЗДЕЛ 3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Использование разработанной во 2-й главе математической модели тепловлагодпереноса в четырехслойной ограждающей конструкции с учётом изменения влажности материалов в процессе эксплуатации требует определения зависимостей коэффициентов теплопроводности и влагодпроводности от сорбционной влажности.

3.1 Лабораторный стенд

Экспериментальные исследования типовых теплоизоляционных материалов IZOVOL, ТЕХНОФАС ПРОФ, ПЕНОПЛЕКС КОМФОРТ проводились в соответствии с ГОСТ 24816-81 [139] и ГОСТ Р 56504-2015 [140] на специальном лабораторном стенде, состоящем из сушильной камеры, специального контейнера и контрольно-измерительных приборов.

Для определения коэффициентов теплопроводности использовалась камера для сорбционного увлажнения опытных образцов, показанная на рисунке 3.1.

Для проведения эксперимента из исследуемых материалов были отобраны образцы размером 100 x 100 x 50 мм в соответствии с ГОСТ 24816-81. После предварительного взвешивания, эти образцы были высушены при 100 ± 5 °C в сушильном шкафу и помещены в камеру (рисунок 3.1), в которой находились на подставке над слоем воды в течении 6 часов. Данная камера состоит из резервуара, где на специальной сетчатой подставке, которая возвышается над слоем воды, находится испытуемый образец. Во время проведения эксперимента крышка камеры плотно герметично закрыта.

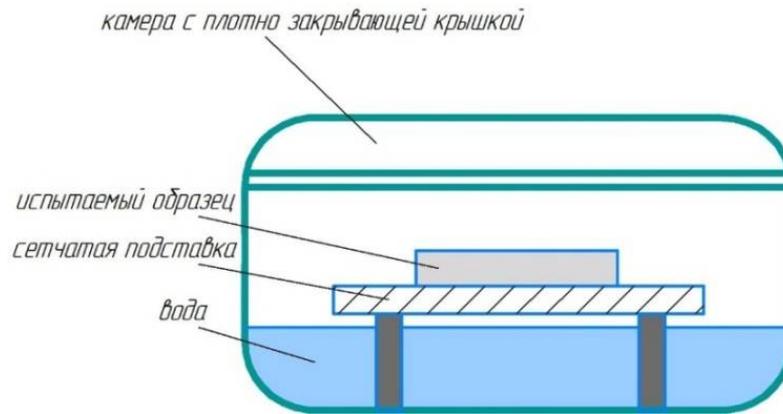


Рисунок 3.1 – Камера для сорбционного увлажнения образцов

После увлажнения образцы взвешивались и подвергались измерению коэффициента теплопроводности с помощью прибора ИТС-1 (рисунок 3.2), зарегистрированного в Госреестре СИ РФ под № 39006-08. Данный прибор предназначен для определения теплопроводности и термического сопротивления широкого спектра строительных и теплоизоляционных материалов методом стационарного теплового потока по ГОСТ 7076-99.



Рисунок 3.2 – Прибор для измерения теплопроводности материалов ИТС-1

Аналогично испытания повторялись с выдерживанием образцов в течении 12; 18; 24; 30; 36 (час) до достижения максимальной сорбционной влажности образцов.

Для определения коэффициентов влагопроводности использовался контейнер, схема которого показана на рисунке 3.3.

Для проведения эксперимента из исследуемых материалов были отобраны образцы размером 100 x 100 x 50 мм в соответствии с ГОСТ Р 56504-2015. Образцы устанавливались вертикально в контейнер с водой так, чтобы нижняя невлагоизолированная грань соприкасалась с поверхностью воды. Не допускалось касание нижней грани образца дна контейнера. Зазор между стенками контейнера и боковой поверхностью образца герметизировали с помощью силикона (рисунок 3.3). Далее контейнер с укрепленным на нем образцом помещался в атмосферу с постоянной температурой и влажностью воздуха. Контейнер периодически взвешивался с образцом до тех пор, пока образец теплоизоляционного материала стал иметь постоянный вес, что означало, в образце установилось стационарное состояние перемещения влаги. Затем определялась влажность материала с помощью влагомера TANEL SWM-1 (рисунок 3.4).

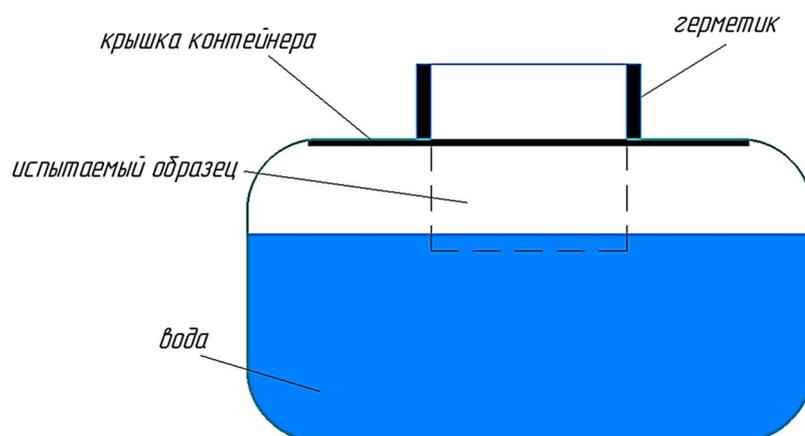


Рисунок 3.3 – Контейнер для испытания образцов на статическую влагопроводность

Коэффициент влагопроводности определялся по данным проведенных измерений согласно с ГОСТ Р 56504-2015, путём построения кривых изменения влажности по высоте образцов. Кривую распределения влажности

аппроксимировали параболой, по которой были найдены значения коэффициента влагопроводности.



Рисунок 3.4 – Влагомер TANEL SWM-1

3.2 Методика обработки экспериментальных данных

Методика обработки экспериментальных данных при лабораторных испытаниях образцов теплоизоляционных материалов основана на статических методах теории вероятности, позволяющих анализировать результаты измерений, определять теплофизические параметры материалов и учитывать влияние различных факторов на свойства образцов [141, 142].

Среднеарифметическое значение определяется как сумма всех значений измеряемой величины в i -ом опыте, отнесенная к количеству этих опытов

$$\bar{x} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k x_i, \quad (3.1)$$

где x_i – действительное значение измеряемой величины в i -ом опыте;

k – число проведенных опытов.

Значение среднеквадратичного отклонения результатов проведенных измерений

$$S_k = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x})^2}{k-1}}. \quad (3.2)$$

Обнаружение грубой погрешности осуществляется с помощью критерия Граббса

$$t_G = |x_j - \bar{x}| / S_k, \quad (3.3)$$

где x_j – значение измеряемой величины, подлежащей проверке.

Если вычисленное значение критерия Граббса больше табличного, то данное измерение для дальнейшей обработки не принимается, а значения величин \bar{x} и S_k вычисляются повторно.

Случайная погрешность измерений

$$\Delta x_c = \frac{t_k S_k}{\sqrt{k}}, \quad (3.4)$$

где t_k – критерий Стьюдента для числа проведенных опытов k при доверительной вероятности $\alpha = 0,95$.

Суммарная погрешность результата измерения Δx состоит из случайной погрешности измерений и систематической погрешности прибора [139]

$$\Delta x = \sqrt{\left(\frac{t_k S_k}{\sqrt{k}}\right)^2 + \left(\frac{\delta t_\infty}{3}\right)^2}, \quad (3.5)$$

где δ – систематическая погрешность прибора;

t_∞ – критерий Стьюдента при $k \rightarrow \infty$.

Погрешности измеряемых параметров для ограждающих конструкций, приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Погрешности измеряемых параметров

Измеряемый параметр	Погрешность
Температура воздуха, °C	0,5
Сорбционная влажность, %	0,07
Коэффициент теплопроводности, Вт/м °C	0,00045
Коэффициент влагопроводности, з/(м час·%)	0,46

3.3 Экспериментальные исследования влияния влажности на коэффициент теплопроводности

Проведенные ранее исследования коэффициента теплопроводности и коэффициента влагопроводности типовых теплоизоляционных материалов отечественного производства не учитывали наличие влаги в их пористой структуре, такой как сорбционная, пленочная, капиллярная влажности и т.д.

Задача проводимых экспериментальных исследований типовых теплоизоляционных материалов, применяемых при утеплении зданий массовой застройки г. Луганска, заключается в получении аналитических зависимостей коэффициентов теплопроводности и влагопроводности от сорбционной влажности.

Результаты испытаний для образца из IZOVOL ($\rho=100 \text{ кг/м}^3$) приведены в таблице 3.2, на основании которых построен график изменения коэффициента теплопроводности от сорбционной влажности (рисунок 3.5).

Коэффициент изменения теплопроводности образца определяется по выражению

$$\zeta = \frac{\lambda_w - \lambda_{\text{сух}}}{\lambda_{\text{сух}}}, \quad (3.6)$$

где ζ – коэффициент изменения теплопроводности теплоизоляционного материала,

λ_w – коэффициент теплопроводности во влажном состоянии,

$\lambda_{\text{сух}}$ – коэффициент теплопроводности в сухом состоянии.

Установлено, что коэффициент изменения теплопроводности образца ζ в зависимости от изменения его сорбционной влажности W_S аппроксимируется линейной функцией

$$\zeta = 1 + 0,043 \cdot W_S. \quad (3.7)$$

Таблица 3.2 – Результаты испытаний для образца из IZOVOL

№ образца	Время выдерживания образца, t , час	Сорбционная влажность образца, W_S , %	Коэффициент теплопроводности, λ_w , Вт/м °С	Коэффициент изменения теплопроводности и образца, ζ
1	0	0	0,0350	1
2	6	0,748	0,0360	1,032
3	12	1,451	0,0370	1,062
4	18	2,891	0,0393	1,124
5	24	5,610	0,0434	1,241
6	30	7,831	0,0468	1,337
7	36	10,012	0,0500	1,430
8	42	12,511	0,0538	1,538

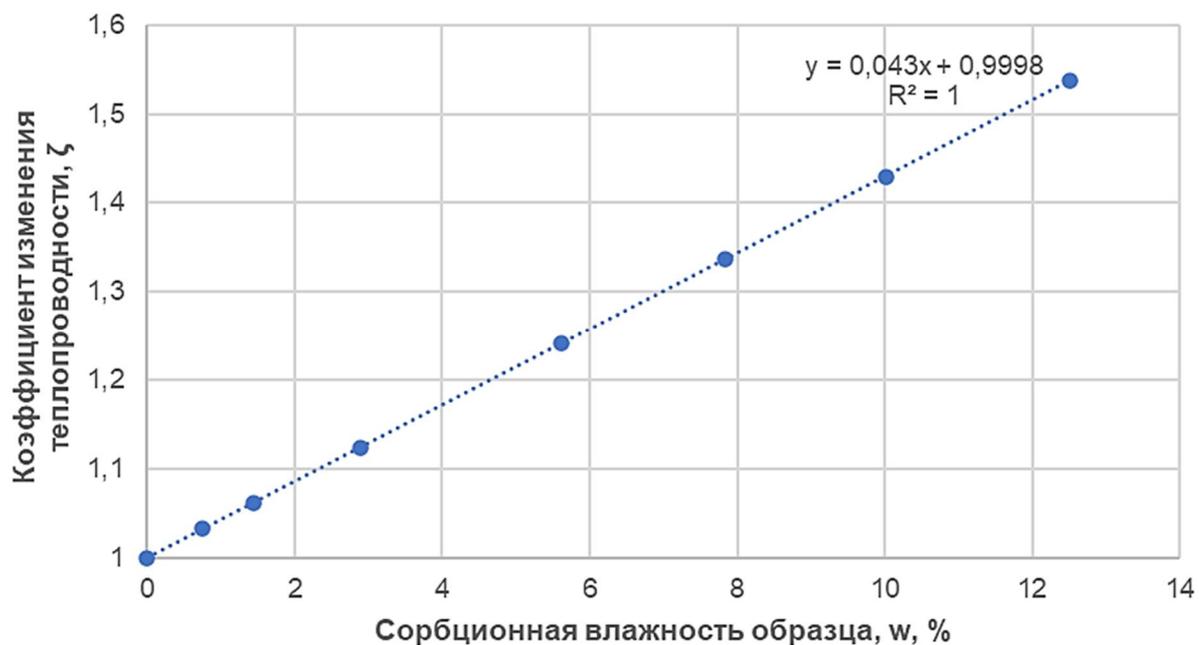


Рисунок 3.5 – Зависимость коэффициента изменения теплопроводности IZOVOL от сорбционной влажности

Коэффициент теплопроводности испытуемого материала IZOVOL описан линейной эмпирической зависимостью

$$\lambda_w = \lambda_{сyx} (1 + 0,043 \cdot W_S), \quad (3.8)$$

где W_S – сорбционная влажность теплоизоляционного материала.

Аналогичным образом были проведены испытания для образцов из ПЕНОПЛЕКС КОМФОРТ и ТЕХНОФАС ПРОФ.

Результаты испытаний для образца из ПЕНОПЛЕКС КОМФОРТ ($\rho=30 \text{ кг/м}^3$) приведены в таблице 3.3, на основании которой построен график (рисунок 3.6), на котором выявлено, что зависимость коэффициента ζ от изменения его сорбционной влажности W_S аппроксимируется линейной функцией

$$\zeta = 1 + 0,032 \cdot W_S. \quad (3.9)$$

Таблица 3.3 – Результаты испытаний для образца из ПЕНОПЛЕКС КОМФОРТ

№ образца	Время выдерживания образца, t , час	Сорбционная влажность образца, W_S , %	Коэффициент теплопроводности, λ_w , Вт/м °С	Коэффициент изменения теплопроводности образца, ζ
1	0	0	0,0340	1
2	6	0,681	0,0347	1,02
3	12	1,264	0,0353	1,04
4	18	2,518	0,0368	1,081
5	24	5,103	0,0396	1,163
6	30	6,411	0,041	1,205
7	36	8,621	0,0434	1,276
8	42	10,901	0,0459	1,349

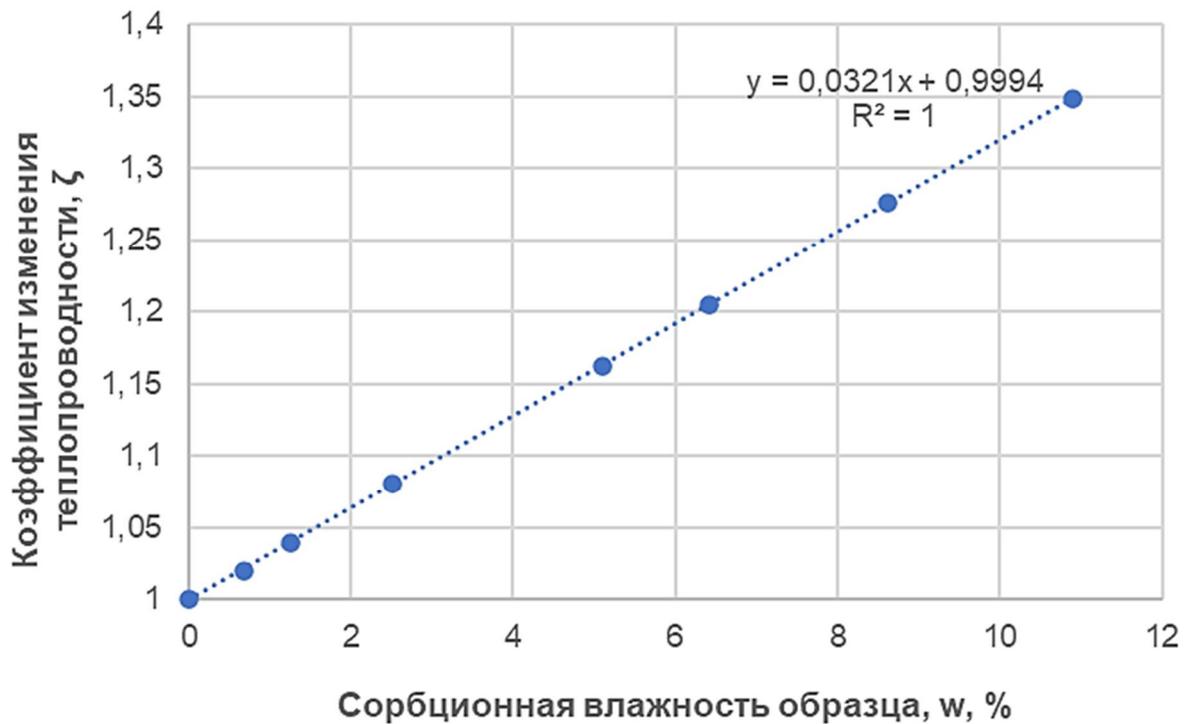


Рисунок 3.6 – Зависимость коэффициента изменения теплопроводности ПЕНОПЛЕКС КОМФОРТ от сорбционной влажности

Результаты испытаний для образца из ТЕХНОФАС ПРОФ ($\rho=155 \text{ кг/м}^3$) приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Результаты испытаний для образца из ТЕХНОФАС ПРОФ

№ образца	Время выдерживания образца, t , час	Сорбционная влажность образца, W_s , %	Коэффициент теплопроводности, λ_w , Вт/м °С	Коэффициент изменения теплопроводности образца, ζ
1	0	0	0,0380	1
2	6	0,768	0,0392	1,031
3	12	1,521	0,0400	1,062
4	18	3,112	0,0423	1,128
5	24	6,235	0,0477	1,256
6	30	8,512	0,0513	1,349
7	36	10,782	0,0548	1,442
8	42	12,981	0,0610	1,532

По результатам таблицы 3.4 построенный график (рисунок 3.7), на котором выявлено, что зависимость коэффициента ζ от изменения его сорбционной влажности W_s аппроксимируется линейной функцией

$$\zeta = 1 + 0,041 \cdot W_s. \quad (3.10)$$

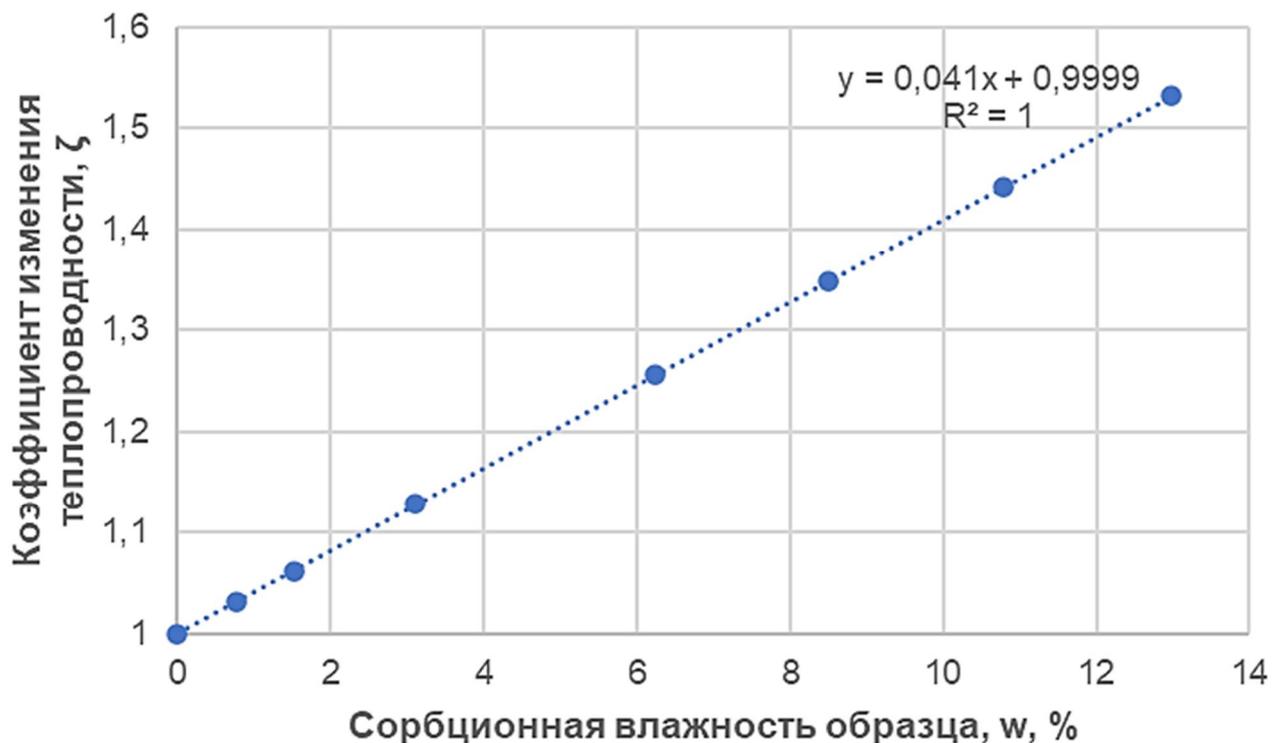


Рисунок 3.7 – Зависимость коэффициента изменения теплопроводности ТЕХНОФАС ПРОФ от сорбционной влажности

В результате этих лабораторных испытаний были получены значения сорбционной влажности и коэффициентов теплопроводности $\lambda = f(W_s)$ испытуемых утеплителей (рисунок 3.8).

Коэффициенты теплопроводности испытуемых материалов описаны линейной эмпирической зависимостью

$$\lambda = \lambda_{сyx} (1 + k \cdot W_s), \quad (3.11)$$

где k – коэффициент, зависящий от вида теплоизоляционного материала.

Установлено, для IZOVOL – $k = 0,043$, для ТЕХНОФАС ПРОФ – $k = 0,041$, для ПЕНОПЛЕКС КОМФОРТ – $k = 0,032$.

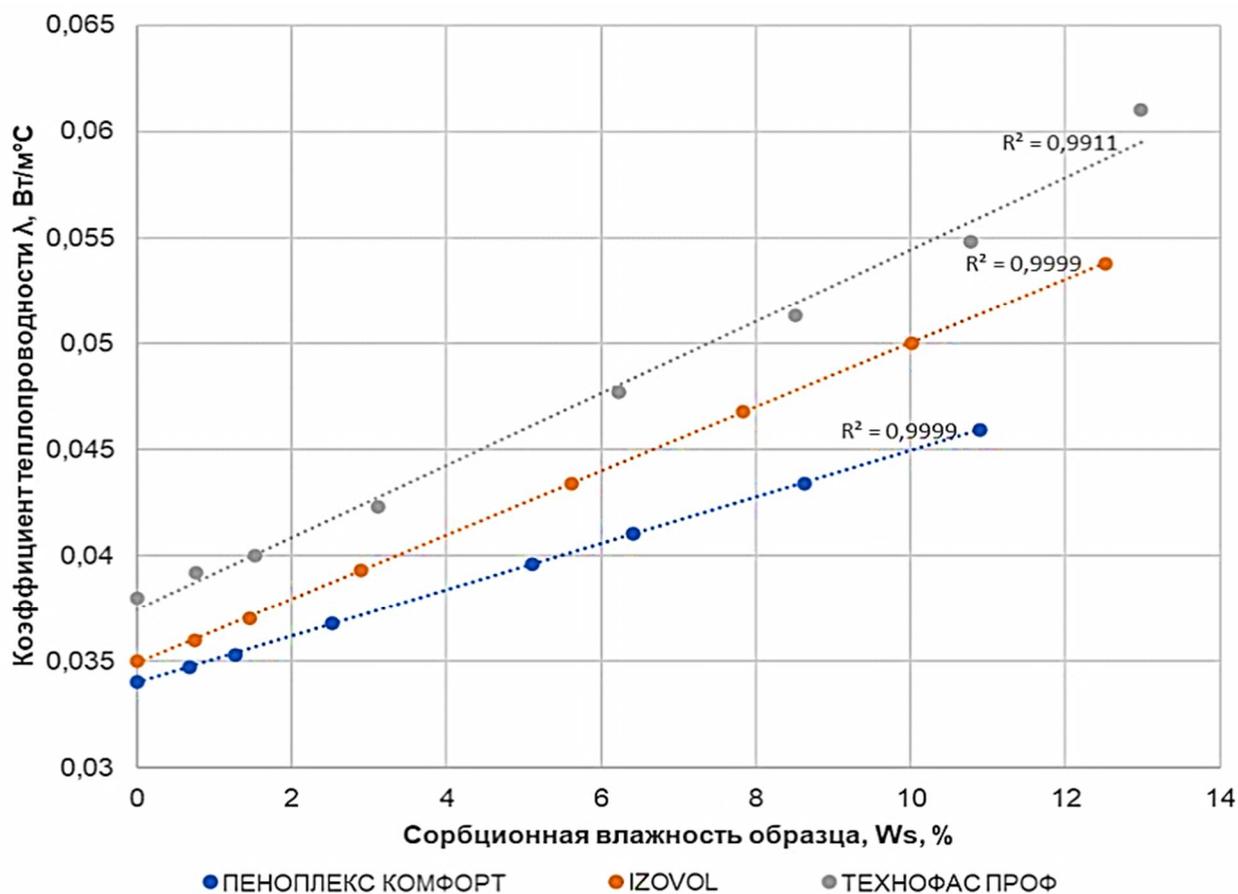


Рисунок 3.8 – Зависимости коэффициентов теплопроводности от сорбционной влажности

3.4 Экспериментальные исследования влияния влажности на коэффициент влагопроводности

Коэффициент влагопроводности β определяется с помощью эксперимента [28]. В работе [24] приводятся значения некоторых значений этого коэффициента.

Коэффициент влагопроводности β представлен линейной зависимостью

$$\beta = B_0 W_s + B_1, \quad (3.12)$$

где B_0 , B_1 – коэффициенты аппроксимации.

Значения B_0 и B_1 для типовых теплоизоляционных материалов, определены методом наименьших квадратов и приведены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – 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
ТЕХНОФАС ПРОФ	155	0,049	-0,019
ПЕНОПЛЕКС КОМФОРТ	30	1,370	-0,150

На рисунке 3.9 показаны зависимости коэффициентов влагопроводимости β от сорбционной влажности W_s для рассмотренных теплоизоляционных материалов.

Влажность утеплителя изменяется со временем в зависимости от изменения температуры внутреннего и внешнего воздуха и от сорбционных свойств материала. Этими свойствами обладают все строительные материалы. Каждый утеплитель имеет определенную зависимость его влажности от относительной влажности воздуха при $T=const$. Такая зависимость называется изотермой сорбции и определяется путём эксперимента по ГОСТ 24816-81 [139].

На рисунке 3.10 приведены изотермы сорбции типовых теплоизоляционных материалов ограждающих конструкций, построенные по результатам лабораторных испытаний [139].

Выполненные исследования полученных изотерм сорбции (рисунок 3.10) путём подбора линий тренда (рисунок 3.11) показали, что все изотермы сорбции аппроксимируются подобными функциями – полиномами третьей степени

$$W_s = A_1 \varphi + A_2 \varphi^2 + A_3 \varphi^3, \quad (3.13)$$

где A_1, A_2, A_3 – коэффициенты аппроксимации.

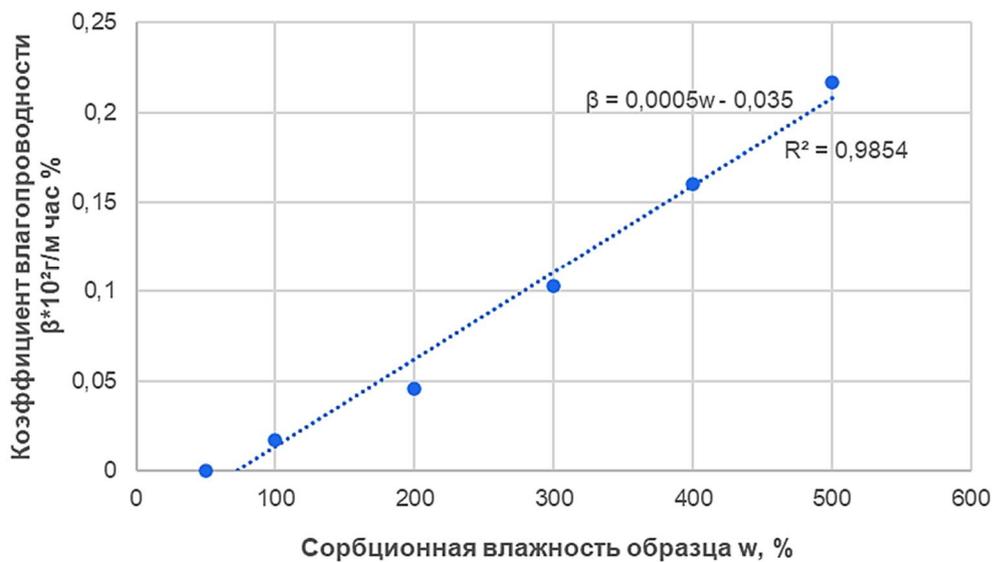
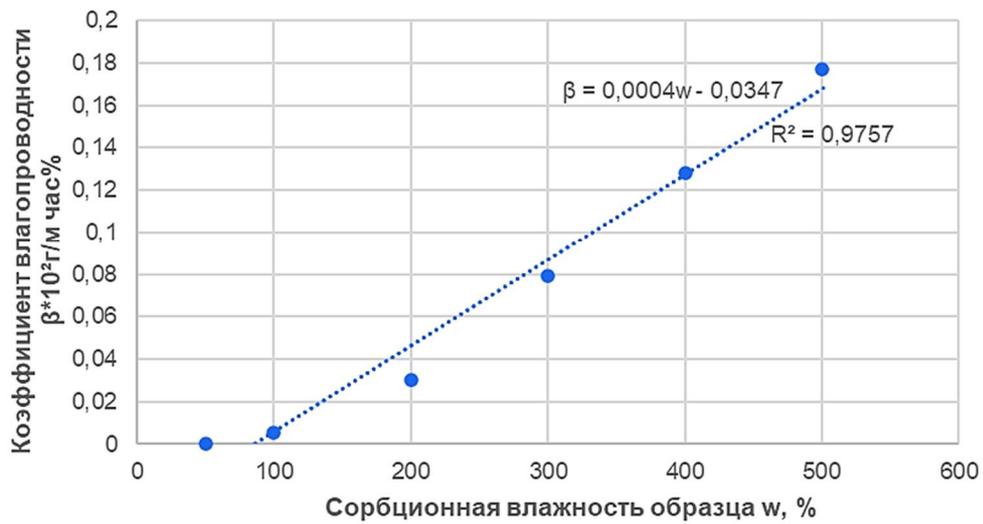
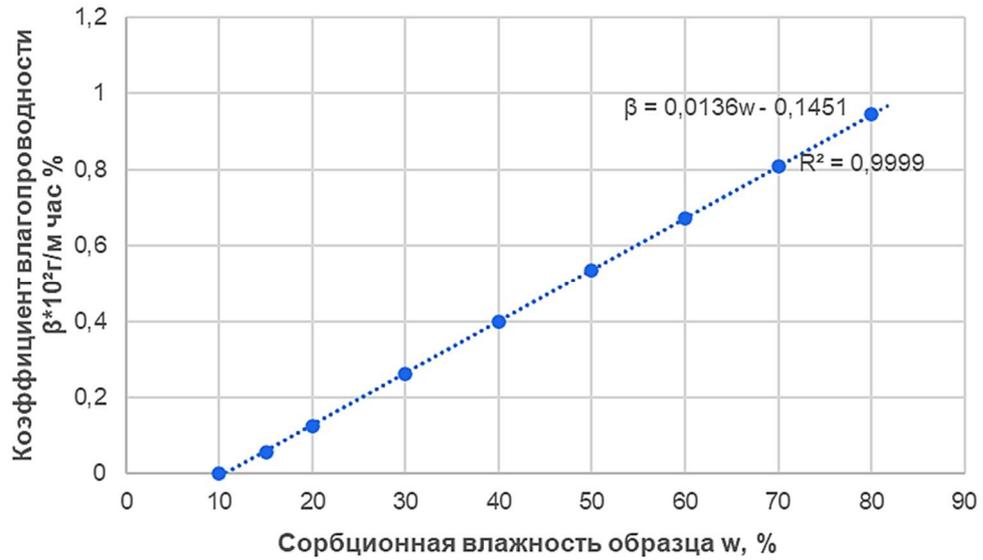


Рисунок 3.9 – Зависимости коэффициентов влагопроводности утеплителей ПЕНОПЛЕКС, ТЕХНОФАС и IZOVOL от сорбционной влажности

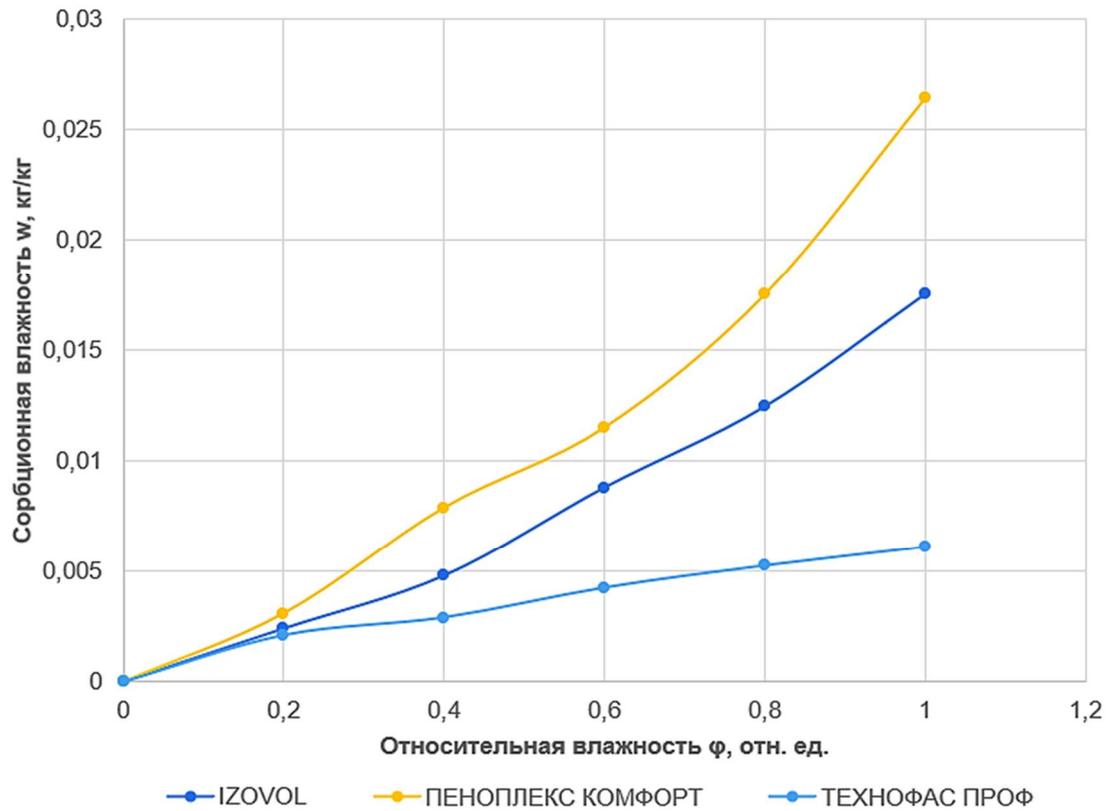


Рисунок 3.10 – Сорбционные свойства теплоизоляционных материалов

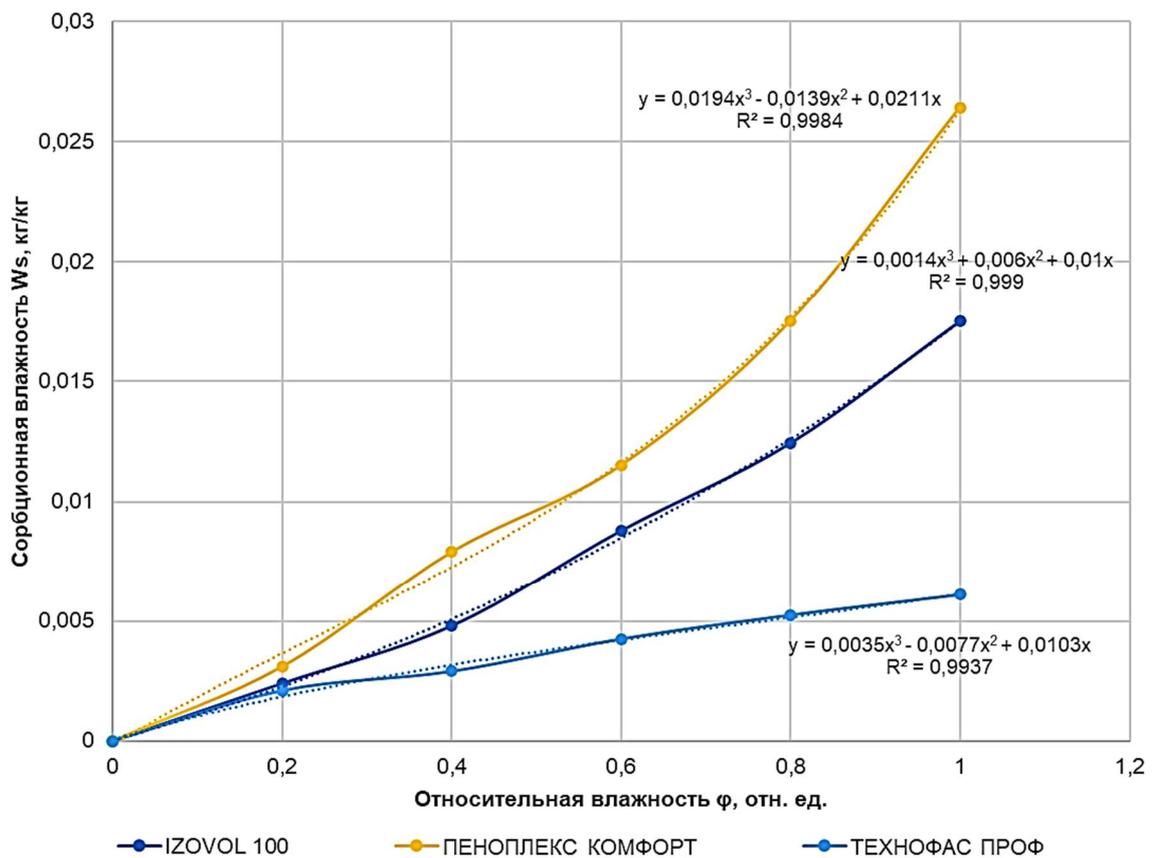


Рисунок 3.11 – Подбор линий тренда для изотерм сорбции

По изотермам сорбции определены коэффициенты аппроксимации A_1, A_2, A_3 для типовых теплоизоляционных материалов, значения которых приведены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – 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
ТЕХНОФАС ПРОФ	155	0,0065	-0,0097	0,0195
ПЕНОПЛЕКС КОМФОРТ	30	0,0245	-0,0320	0,0260

Сорбционная влажность слоев ограждающей конструкции прямо пропорциональна относительной влажности, которая в свою очередь определяется парциальным давлением водяного пара в порах материала, что было отмечено ранее в разделе 2.

3.5 Оценка адекватности полученных аппроксимационных зависимостей

Адекватности аппроксимационных характеристик проверялась по критерию Фишера [141, 142], который определяется отношением дисперсий адекватности к дисперсии воспроизводимости

$$F = \frac{S_{ад}^2}{S_{восп}^2}, \quad (3.14)$$

где $S_{ад}^2$ – дисперсия адекватности;

$S_{восп}^2$ – дисперсия воспроизводимости.

Дисперсия адекватности определяется соотношением

$$S_{ad}^2 = \frac{\sum_{j=1}^p (y_{эj} - y_{рj})^2}{p - m - 1}, \quad (3.15)$$

где $y_{эj}$ – экспериментальные значения опытных данных;

$y_{рj}$ – расчётные значения;

p – количество сравниваемых значений;

m – количество коэффициентов, полученных из эксперимента.

Дисперсия воспроизводимости определяется соотношением

$$S_{восн}^2 = \sum_{j=1}^p \frac{S_{mj}^2}{p}, \quad (3.16)$$

где S_{mj}^2 – среднеквадратичное отклонение j -го результата.

Если значение критерия Фишера меньше табличного $F < F_m$, то установленные характеристики и расчётные зависимости полагались адекватными.

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

Наличие аналитических выражений для коэффициентов теплопроводности (3.11) и коэффициентов влагопроводности (3.12) позволяет усовершенствовать методы определения теплотехнических характеристик ограждающих конструкций.

Выводы по третьему разделу

На основании проведенных исследований сделаны следующие выводы:

1. Разработан лабораторный стенд, выбрана контрольно-измерительная аппаратура, подготовлены лабораторные образцы теплоизоляционных материалов IZOVOL, ТЕХНОФАС ПРОФ, ПЕНОПЛЕКС КОМФОРТ.

2. Представлена методика проведения экспериментальных исследований, обработки опытных данных и оценки адекватности аппроксимационных зависимостей.

3. Выполнены экспериментальные исследования по влиянию сорбционной влажности на коэффициент теплопроводности теплоизоляционных материалов. Показан линейный характер зависимости коэффициента теплопроводности от сорбционной влажности.

4. Выполнены экспериментальные исследования по влиянию сорбционной влажности на коэффициент влагопроводности теплоизоляционных материалов. Показан линейный характер зависимости коэффициента влагопроводности от сорбционной влажности.

5. Получены аппроксимационные зависимости для коэффициентов теплопроводности и коэффициентов влагопроводности от сорбционной влажности. Оценка адекватности расчетных выражений проводилась по критерию Фишера. Значения экспериментального критерия Фишера $F_{экс} < 1,57$ не превышали табличного $F_m = 1,81$ при доверительной вероятности $\alpha = 0,95$, что позволило считать полученные аппроксимационные зависимости адекватными.

6. Результаты экспериментальных исследований опубликованы в работах [143-147].

РАЗДЕЛ 4

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЧЕТЫРЕХСЛОЙНОЙ ОГРАЖДАЮЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ

В Луганской Народной Республике здания жилого и гражданского назначения практически в полном объеме были возведены по типовым проектам, соответствующим нормам проектирования, действовавшим на территории бывшего Советского Союза. Стены возводились из кирпича, толщиной 510 мм или из легкого бетона, толщиной 250 мм. Сегодня многие здания для улучшения их теплотехнических показателей утепляют современными утеплителями.

С целью разработки рекомендаций по повышению эффективности систем отопления эксплуатационных зданий массовой застройки, анализа энергоэффективности и экономической целесообразности применения типовых теплоизоляционных материалов проведено моделирование теплотехнических характеристик четырехслойной ограждающей конструкции на примере зданий г. Луганска. В процессе исследования рассматривались наиболее характерные фрагменты стены: участок сплошной стены и углы стен.

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

На основе разработанной математической модели и экспериментально полученных зависимостей коэффициентов теплопроводности и влагопроводности предложена методика моделирования теплотехнических характеристик четырехслойной ограждающей конструкции с учетом изменения влажности в

процессе эксплуатации, позволяющая анализировать энергоэффективность и экономическую целесообразность применения 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. Были использованы вычислительные возможности модуля Simulink пакета программ MATLAB путём его импортирования в среду пакета программ COMSOL Multiphysics 6.2. Фрагмент интерфейса пакета программ COMSOL Multiphysics 6.2 показан на рисунке 4.1.

Значения температуры и относительной влажности внешнего воздуха для г. Луганска принимались согласно климатическим параметрам [148] и представлены в табл. 4.1, 4.2.

Таблица 4.1 – Средняя температура наружного воздуха, °C по месяцам [148]

Город	Средняя по месяцам температура наружного воздуха, °C по месяцам											
Луганск	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
	-6.6	-6	-0.4	8.6	16.1	19.7	22.3	21	15	8.1	1.4	-3.8

Таблица 4.2 – Средняя относительная влажность наружного воздуха, % по месяцам [148]

Город	Средняя относительная влажность наружного воздуха, % по месяцам											
Луганск	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
	86	85	82	66	56	57	55	56	61	75	84	87

В работе 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. При тепловизионной съемке использовался профессиональный тепловизор 256x192 Mileseeu TR256E. Этот прибор способен распознавать температуру от $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Обследования выполнялись в соответствии с ГОСТ и СНиП и другими релевантными стандартами.

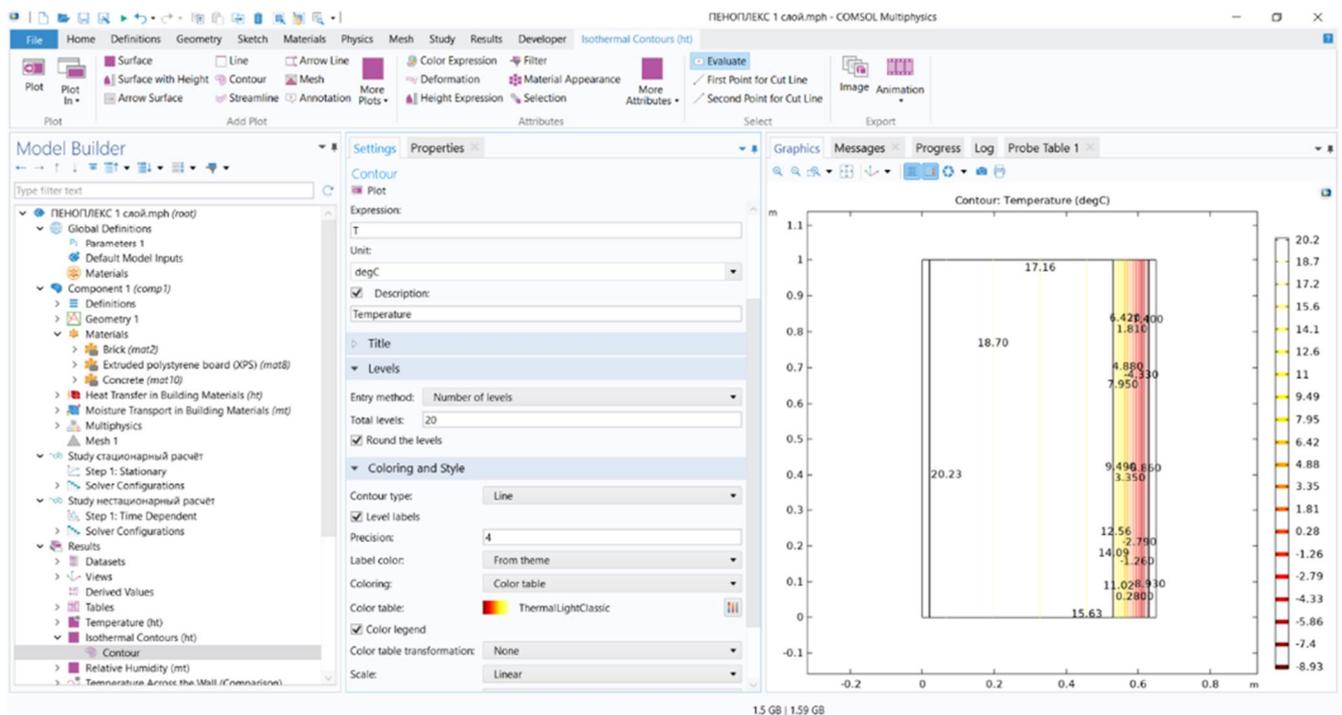


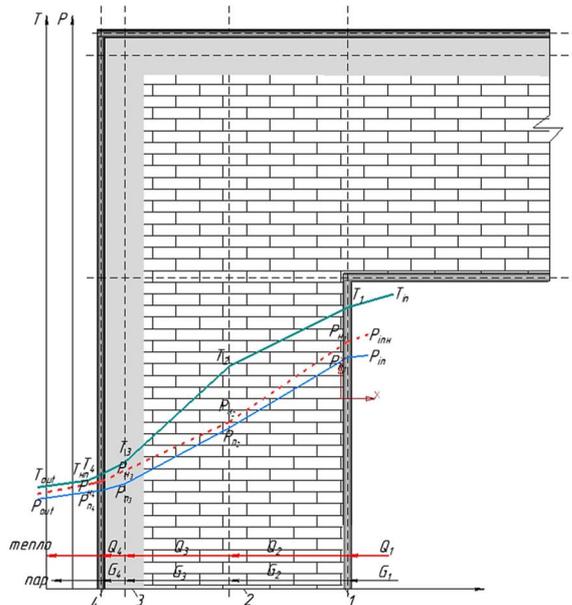
Рисунок 4.1 – Фрагмент интерфейса пакета программ COMSOL Multiphysics 6.2

4.2 Расчётные схемы исследуемых наружных ограждающих конструкций

Конструкция наружной стены кирпичного дома со слоем теплоизоляционного материала представлена на рисунке 2.1. Это четырехслойный конструктив, состоящий из штукатурного слоя известковой штукатурки, кирпичной стены из силикатного кирпича толщиной 510 мм или из керамзитобетонной панельной стены, теплоизоляционного материала, облицовочного слоя (штукатурка). Угол данного здания показан на рисунке 4.2.

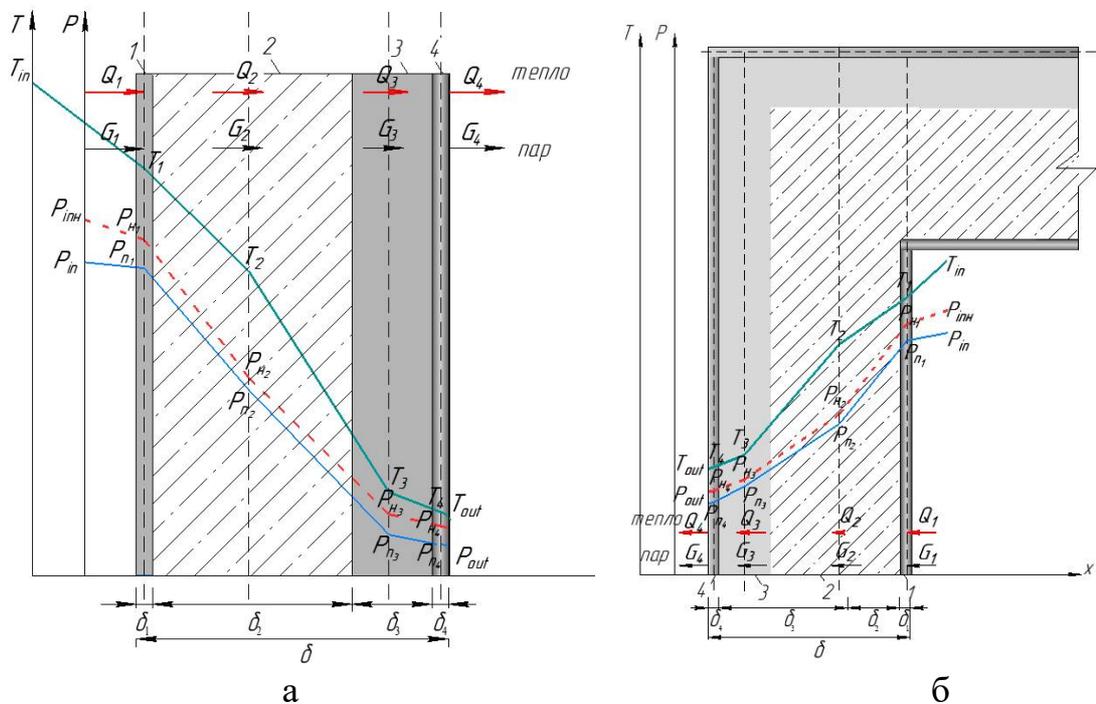
Конструкция наружной легкобетонной (керамзитобетонной) стены, состоящая из слоя штукатурки, легкобетонной стеновой панели толщиной 250 мм,

теплоизоляционного материала и облицовочного слоя, представлена на рисунке 4.3.



- 1 – штукатурный слой известковой штукатурки, 2 – кирпичная стена,
3 – теплоизоляционный материал, 4 – облицовочный слой (штукатурка)

Рисунок 4.2 – Угол здания ограждающей конструкции с кирпичной кладкой



- а – фрагмент стены; б – фрагмент угла здания; 1 – штукатурный слой известковой штукатурки,
2 – легобетонная стеновая панель,
3 – теплоизоляционный материал, 4 – облицовочный слой (штукатурка)

Рисунок 4.3 – Схема ограждающей конструкции с бетонной панелью

4.2.1 Ограждающая конструкция кирпичного здания с теплоизоляционным материалом ПЕНОПЛЕКС КОМФОРТ

Конструкция наружной стены кирпичного дома со слоем теплоизоляционного материала представлена на рисунке 2.1. Данное здание находится по адресу: квартал Комарова, 18 (рисунок 4.4), в качестве утеплителя использован теплоизоляционный материал ПЕНОПЛЕКС КОМФОРТ.

Температура воздуха внутри помещения принималась $T_{in} = 21 \text{ }^{\circ}\text{C}$, относительная влажность внутреннего воздуха $\varphi_{in} = 59 \%$. Параметры наружного воздуха приведены в таблице 4.1 и 4.2.



Рисунок 4.4 – Фото фасада здания

Теплофизические параметры материалов рассматриваемой стены представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Исходные данные для расчета

№	Параметры	Внутренняя штукатурка (цементно-песчаный раствор)	Кирпичная кладка	ПЕНОПЛЕКС КОМФОРТ	Внешняя штукатурка (цементно-песчаный раствор)
1.	Толщина слоя, <i>м</i>	0,02	0,51	0,10	0,02
2.	Плотность, <i>кг/м³</i>	1800	1800	30	1800
3.	Теплоемкость, <i>кДж/(кг °С)</i>	0,84	0,88	1	0,84
4.	Коэффициент теплопроводности, <i>Вт/(м °С)</i> - в сухом состоянии - во влажном состоянии	0,76 0,93	0,7 0,81	0,034 0,0348	0,76 0,93
5.	Коэффициент паропроницаемости <i>мг/(м ч·Па)</i>	0,09	0,1	0,013	0,09
6.	Коэффициент теплообмена поверхности ограждения - с внутренним воздухом, <i>Вт/(м °С)</i> - с наружным воздухом, <i>Вт/(м °С)</i>	8,7 23,0			
7.	Коэффициенты аппроксимации A1 A2 A3 B0 B1	0,0121 -0,0178 0,0158 0,0099 0,0062	0,0123 -0,0180 0,0161 0,0238 0,0199	0,0245 -0,0320 0,0260 0,000157 -0,000198	0,0121 -0,0178 0,0158 0,0099 0,0062

На рисунке 4.5 приведены результаты расчёта температурного поля в среднем сечении каждого слоя наружной ограждающей конструкции на протяжении года эксплуатации.

Анализ графика изменения температуры за каждый месяц эксплуатации (рисунок 4.5) показывает, что температура на внутренней поверхности ограждающей конструкции изменяется в диапазоне от 18,64 до 22,55 °С. в течение всего периода эксперимента. Разница между температурой внутреннего воздуха и температурой внутренней поверхности конструкции находится в пределах от 1,55 до 2,56 °С, что не превышает нормативных требований.

Таким образом, полученные данные свидетельствуют о том, что условия для образования конденсата на внутренней поверхности ограждающей конструкции не

возникают, что является важным фактором для обеспечения долговечности и эксплуатационной надежности здания.

В среднем сечении первого и второго слоев ограждающей конструкции температура не опускается ниже значения нормативного значения точки росы, равного 11,2 °С, что говорит об возможности образования конденсата на границе третьего слоя.

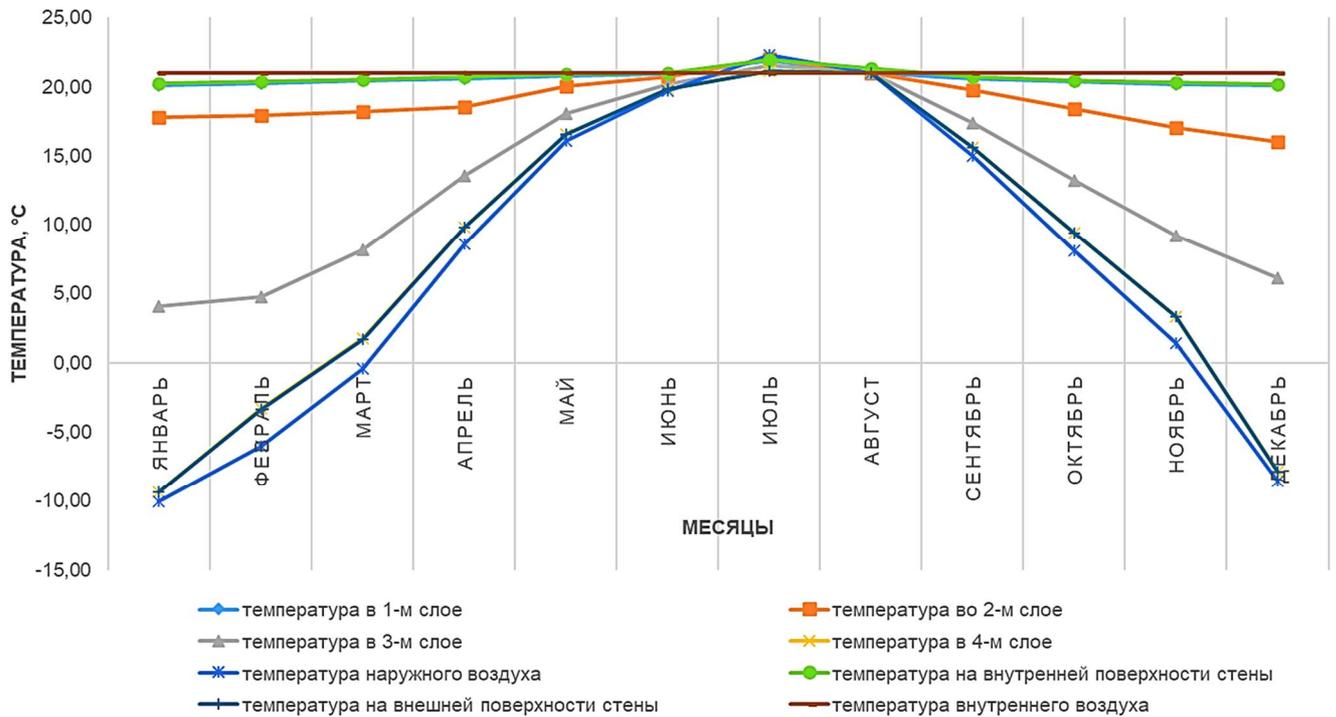
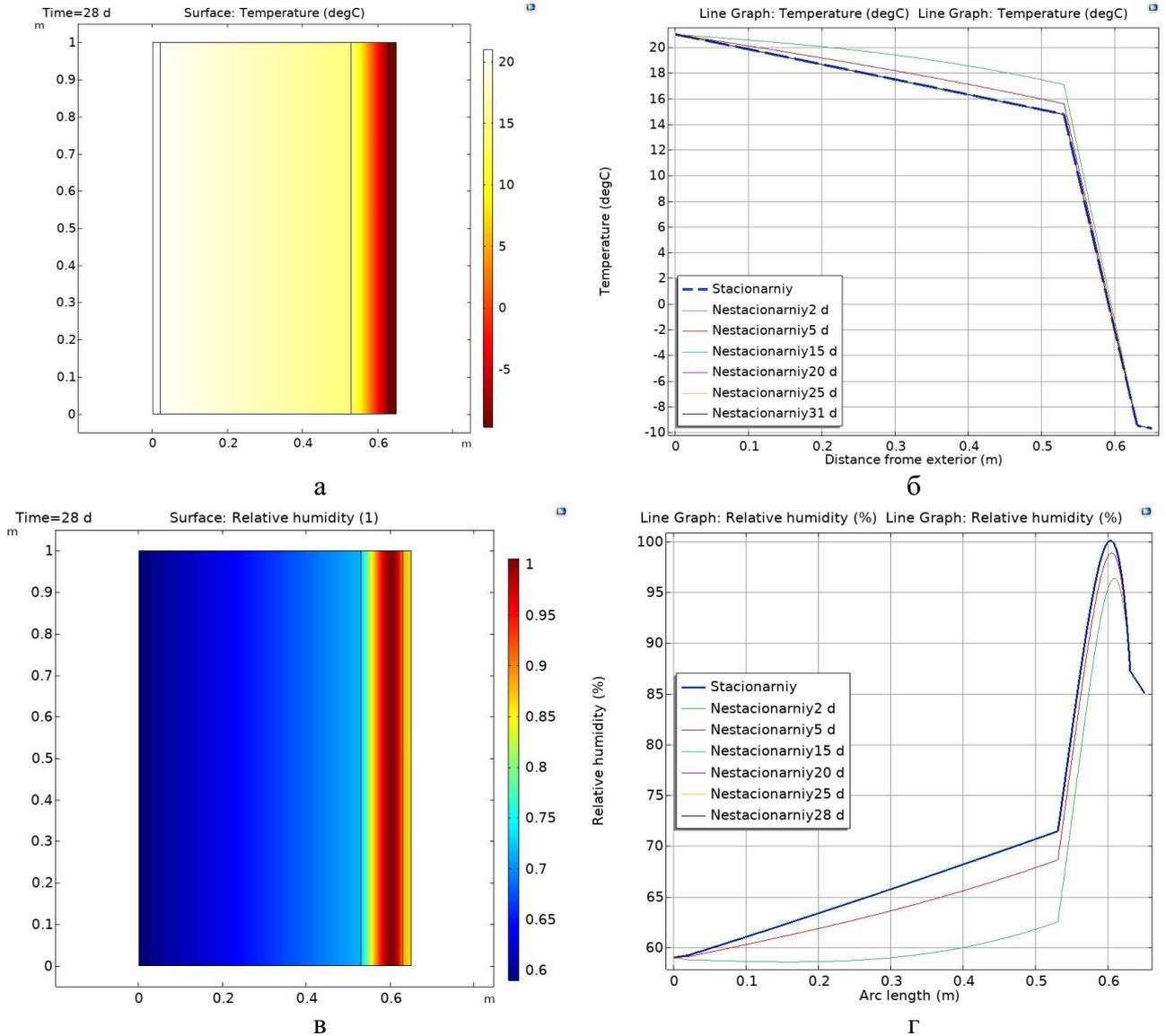


Рисунок 4.5 – Температурное поле в сечении ограждающей конструкции с утеплителем ПЕНОПЛЕКС КОМФОРТ на протяжении года

В период с ноября по март температура в среднем сечении теплоизоляционного слоя опускается ниже точки росы. Это критическое обстоятельство указывает на потенциальную возможность конденсации влаги внутри третьего слоя конструкции. Данный процесс, если его не контролировать, может привести к аккумуляции конденсационной влаги, что со временем негативно скажется на эксплуатационных характеристиках ограждающей конструкции.

На рисунке 4.6 приведены результаты моделирования температурного поля и относительной влажности в ограждающей конструкции с утеплителем ПЕНОПЛЕКС КОМФОРТ на протяжении самого холодного месяца эксплуатации.



а – изополя температуры; б – графики изменения температуры;

в – изополя относительной влажности;

г – графики изменения относительной влажности

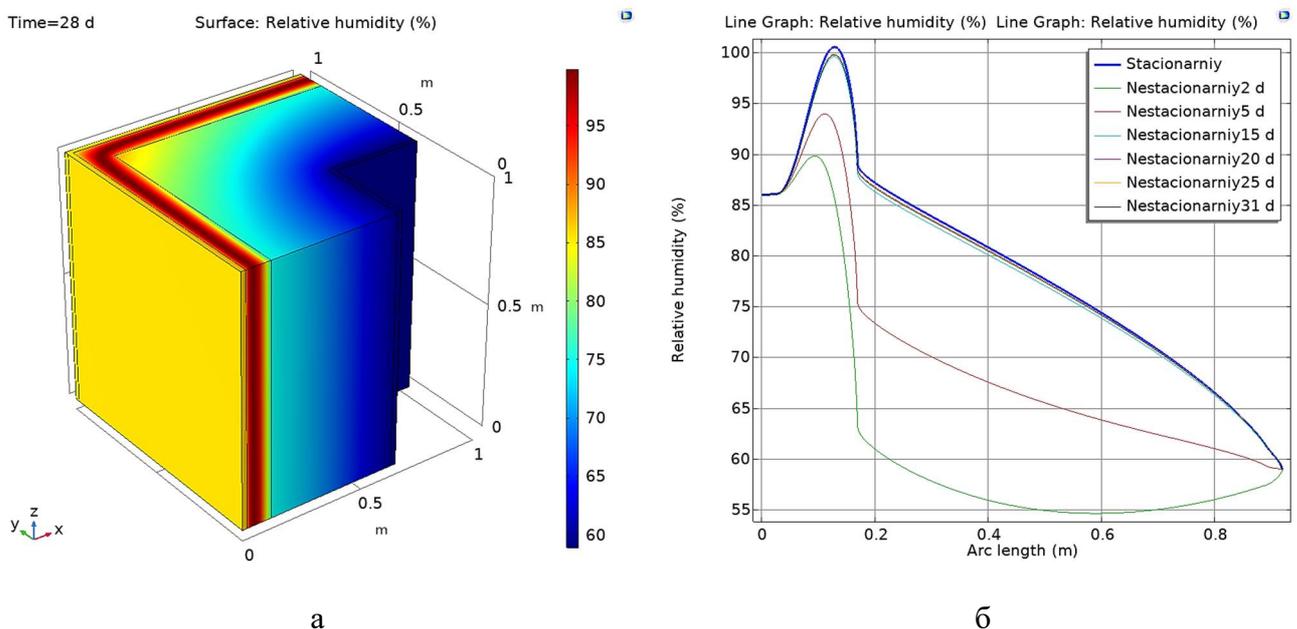
Рисунок 4.6 – Распределение температуры и относительной влажности по толщине стены

На поперечном разрезе кирпичной кладки (см. рисунок 4.6, а) наблюдается постепенное падение температуры от комфортных 21 °С внутри помещения до

14,7 °С. Однако, при переходе в слой теплоизоляции, температура резко устремляется вниз, достигая отметки в –9,8 °С.

Относительная влажность, в свою очередь (рисунок 4.6, б), демонстрирует более плавное изменение в пределах кирпичной стены, возрастая от 59 % у внутренней поверхности до 74 % у границы с утеплителем. В самом же утеплителе происходит резкий скачок влажности, приближающийся к максимально возможному значению, после чего наблюдается её снижение до 86 %.

Анализ изополей и графиков изменения относительной влажности для углового участка здания (рисунок 4.7) показывает схожие тенденции. На участке стены, простирающемся от внутреннего угла к внешней среде, в слое утеплителя также фиксируется резкий скачок влажности. Затем, влажность снижается до 95 %, после чего происходит её равномерное уменьшение по толщине стены до 55 %. Таким образом, утеплитель в угловых зонах здания также подвержен повышенному увлажнению, что следует учитывать при проектировании и эксплуатации зданий.



а – изополя относительной влажности, б – графики изменения влажности

Рисунок 4.7 – Изменение относительной влажности для угла здания

В качестве примера для дальнейшего сравнения с результатами тепловизионного обследования на рисунке 4.8 представлено расчётное температурное поле в сечении ограждающей конструкции 07.02.2025 г.

Внешняя термограмма тепловизионного обследования фасада здания с четырёхслойной ограждающей конструкцией представлена на рисунке 4.9.

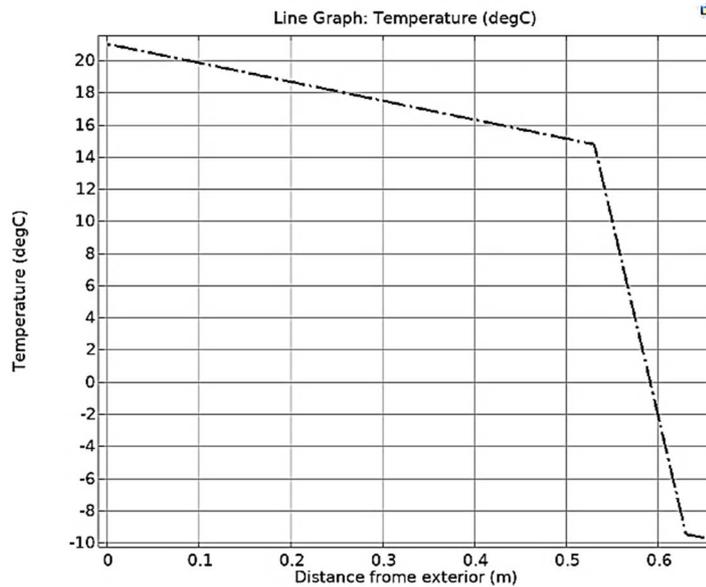
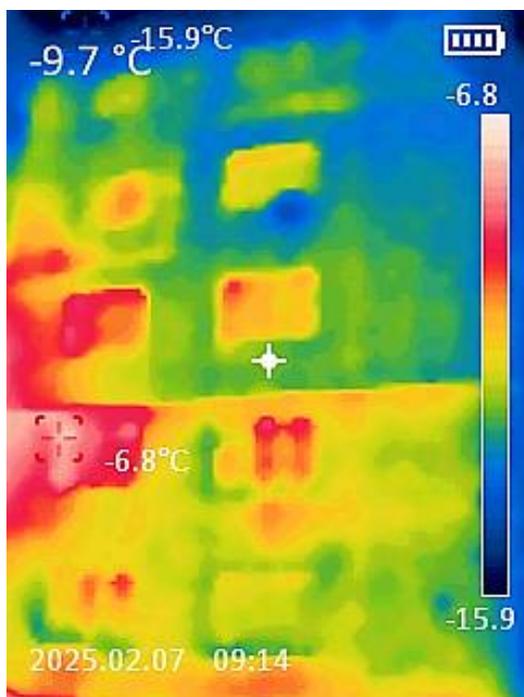


Рисунок 4.8 – Распределение температуры в сечении ограждающей конструкции
07.02.2025 г.



а



б

а – фронтальная стена; б – торцевая стена

Рисунок 4.9 – Внешняя термограмма фасада зданий

Фактическая температура на поверхности фронтальных и торцевых стен, утепленных теплоизоляционным материалом, колеблется в пределах $-9,3 \dots -9,5$ °С. По результатам компьютерного моделирования температура на внешней поверхности имеет значения $-9,6$ °С.

4.2.2 Ограждающая конструкция кирпичного здания с теплоизоляционным материалом ТЕХНОФАС ПРОФ

Конструкция наружной стены кирпичного дома со слоем теплоизоляционного материала представлена на рисунке 2.1. Данное здание находится по адресу: Красная площадь, 1 (рисунок 4.10), в качестве утеплителя использован теплоизоляционный материал ТЕХНОФАС ПРОФ.

Внутри помещения поддерживалась постоянная температура $T_{in} = 21$ °С, а относительная влажность воздуха составляла $\varphi_{in} = 54$ %. Это обеспечивало комфортные условия для находящихся в здании, а также позволяло проводить точные измерения и моделирование процессов тепло- и влагопереноса в ограждающих конструкциях. Для оценки влияния внешних факторов на состояние стены были использованы параметры наружного воздуха, представленные в таблицах 4.1 и 4.2.

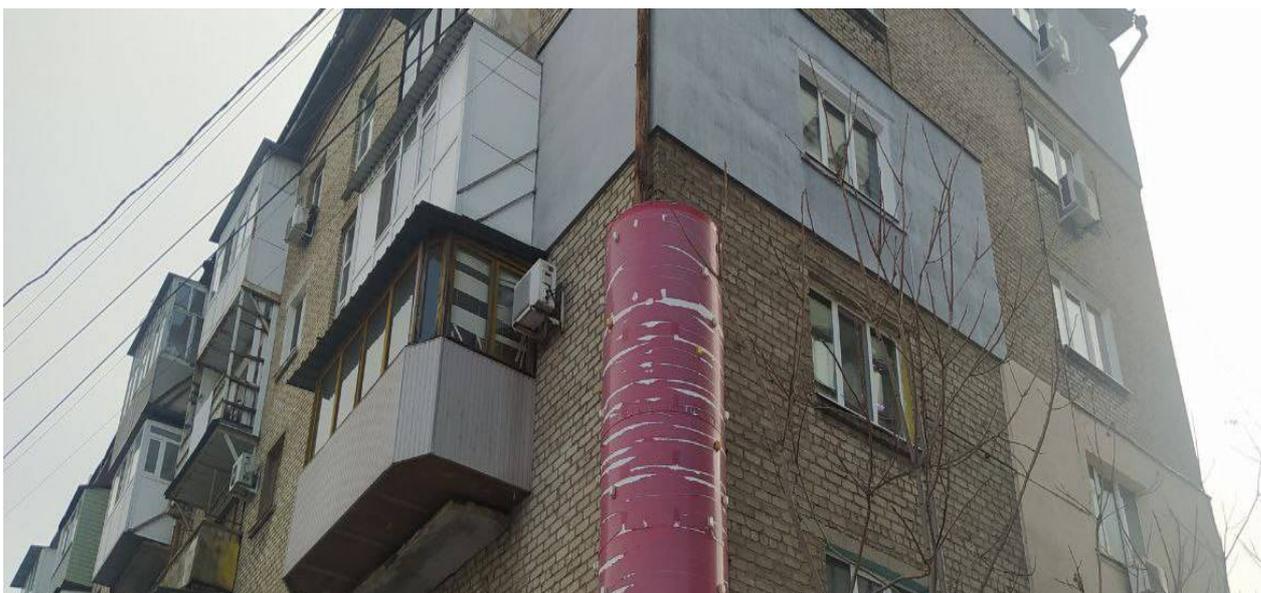


Рисунок 4.10 – Фото фасада здания

Теплофизические параметры материалов рассматриваемой стены представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Исходные данные для расчета

№	Параметры	Внутренняя штукатурка (цементно-песчаный раствор)	Кирпичная кладка	ТЕХНОФАС ПРОФ	Внешняя штукатурка (цементно-песчаный раствор)
1.	Толщина слоя, <i>м</i>	0,02	0,51	0,05	0,02
2.	Плотность, <i>кг/м³</i>	1800	1800	155	1800
3.	Теплоемкость, <i>кДж/(кг °С)</i>	0,84	0,88	1	0,84
4.	Коэффициент теплопроводности, <i>Вт/(м °С)</i> - в сухом состоянии - во влажном состоянии	0,76 0,93	0,7 0,81	0,038 0,0392	0,76 0,93
5.	Коэффициент паропроницаемости <i>мг/(м ч·Па)</i>	0,09	0,1	0,013	0,09
6.	Коэффициент теплообмена поверхности ограждения - с внутренним воздухом, <i>Вт/(м °С)</i> - с наружным воздухом, <i>Вт/(м °С)</i>	8,7 23,0			
7.	Коэффициенты аппроксимации A1 A2 A3 B0 B1	0,0121 -0,0178 0,0158 0,0099 0,0062	0,0123 -0,0180 0,0161 0,0238 0,0199	0,0065 -0,0097 0,0195 0,000157 -0,000198	0,0121 -0,0178 0,0158 0,0099 0,0062

На рисунке 4.11 приведены результаты расчёта температурного поля в среднем сечении каждого слоя наружной ограждающей конструкции на протяжении года эксплуатации.

Анализ изменения значений температуры за этот период (рисунок 4.11) показывает, что температура на внутренней поверхности ограждающей конструкции варьируется в диапазоне от 19,87 до 22,14 °С в течение всего периода эксперимента. Разница между температурой внутреннего воздуха и температурой внутренней поверхности конструкции находится в пределах от 1,32 до 1,89 °С. Следует подчеркнуть, что зафиксированный диапазон отклонений всецело

соответствует действующим нормативным предписаниям, не представляя собой критического отступления от установленных параметров.

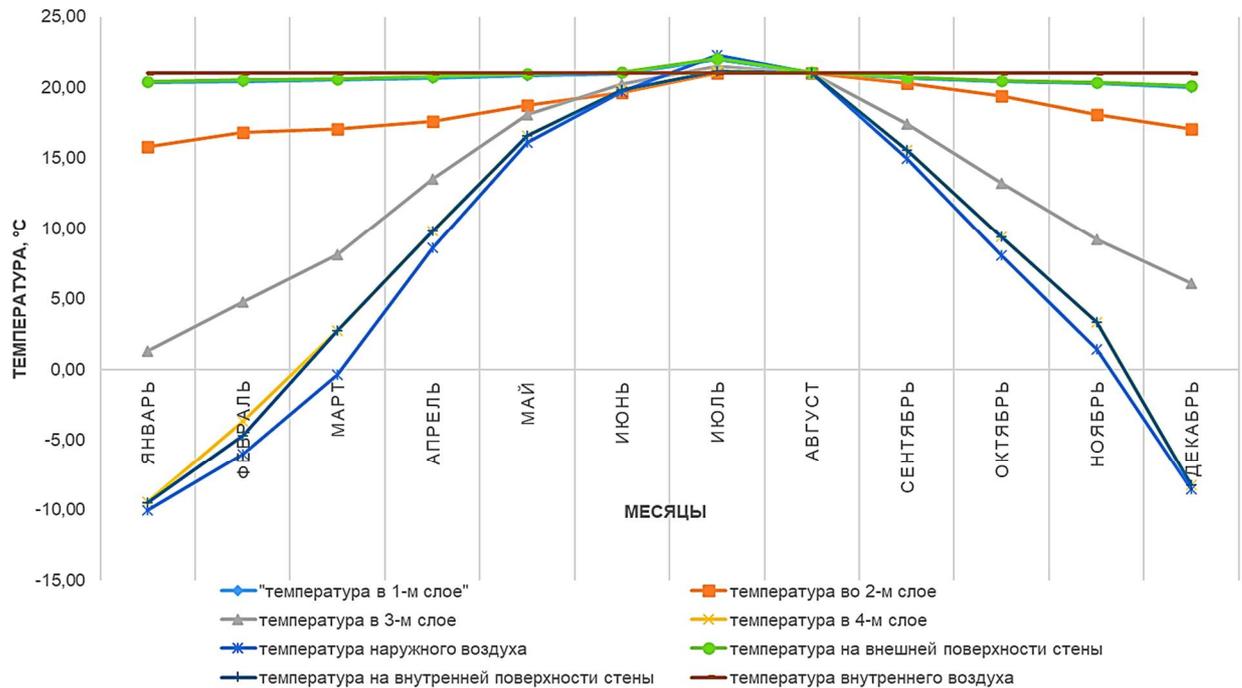


Рисунок 4.11 – Температурное поле в сечении ограждающей конструкции с утеплителем ТЕХНОФАС ПРОФ

В сущности, искусственно воссозданные параметры микроклимата обеспечивают надежный барьер против возникновения конденсата на внутренней границе ограждающей системы, что, в свою очередь, является краеугольным камнем в предотвращении целого ряда деструктивных процессов. Перманентное увлажнение строительных материалов неизбежно влечет за собой снижение их эксплуатационных характеристик, провоцирует развитие плесени и грибка, а в долгосрочной перспективе – приводит к необратимым изменениям структуры и, как следствие, к частичному или полному разрушению.

Температурный профиль, тщательно выверенный и зафиксированный в срединных сечениях первого и второго слоев конструкции, демонстрирует устойчивое превышение критической отметки, определяющей точку росы, которая в данном контексте установлена на уровне 11,2 °C. Этот факт имеет принципиальное значение, поскольку гарантирует, что парциальное давление

водяного пара в этих слоях никогда не достигнет насыщения, тем самым исключая саму возможность конденсации.

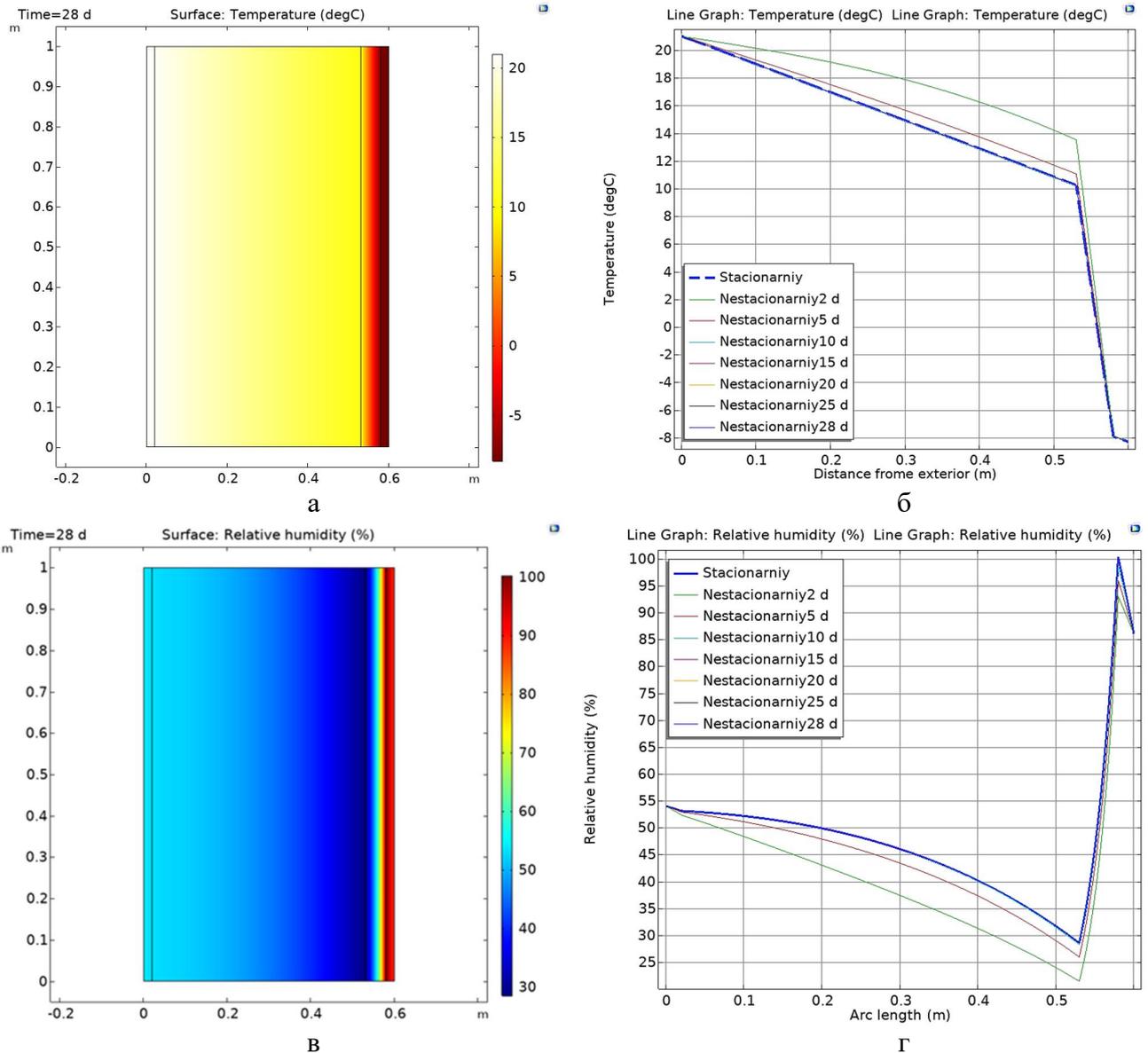
В практическом плане это означает, что риск образования нежелательной влаги сведен к абсолютному минимуму, что, безусловно, положительно сказывается на сохранении исходных физико-технических свойств материалов, составляющих указанные слои. Обеспечение надлежащей функциональности и увеличение срока службы всей ограждающей конструкции в целом является прямым следствием поддержания этих стабильных и контролируемых условий, где конденсат попросту не имеет шансов на образование.

В период с ноября по март температура в среднем сечении слоя утеплителя опускается ниже точки росы. Это критическое обстоятельство указывает на потенциальную возможность конденсации влаги внутри третьего слоя конструкции. Данный процесс, если его не контролировать, может привести к аккумуляции конденсационной влаги, что со временем негативно скажется на эксплуатационных характеристиках ограждающей конструкции.

На рисунке 4.12 приведены результаты моделирования температурного поля и относительной влажности в ограждающей конструкции с теплоизоляционным материалом ТЕХНОФАС ПРОФ на протяжении самого холодного месяца эксплуатации.

В сечении кирпичной кладки (рисунок 4.12, а) температура постепенно снижается от 21 °С до 9,8 °С, а в слое теплоизоляционного материала быстро уменьшается до -7,7 °С. Относительная влажность (рисунок 4.12, б) по всей толщине кирпичной стены меняется равномерно от 54 % до 20 %, а в толщине утеплителя наблюдается резкий скачок величины влажности до максимального значения, а затем уменьшение до 86 %.

На рисунке 4.13 приведены изополя и графики изменения относительной влажности для угла здания. График построен для участка стены от внутреннего угла к внешнему. На графике в слое утеплителя наблюдается скачок значения влажности 87,1 %, а затем её уменьшение до 44,3 % и равномерного повышения по толщине стены до 54 %.



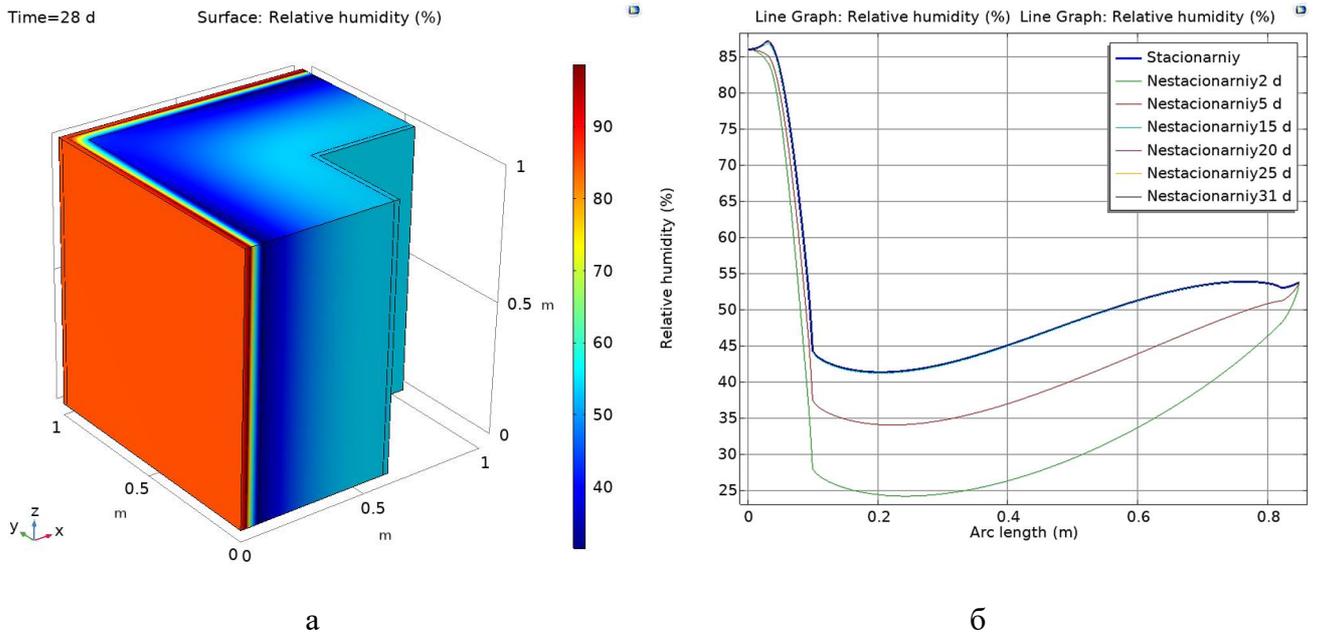
а – изополя температуры; б – графики изменения температуры;

в – изополя относительной влажности;

г – графики изменения относительной влажности

Рисунок 4.12 – Распределение температуры и относительной влажности по толщине стены

В качестве примера для дальнейшего сравнения с результатами тепловизионного обследования на рисунке 4.14 представлено расчётное температурное поле в сечении ограждающей конструкции 09.02.2025 г.



а – изополя относительной влажности, б – графики изменения влажности
 Рисунок 4.13 – Изменение относительной влажности для угла здания

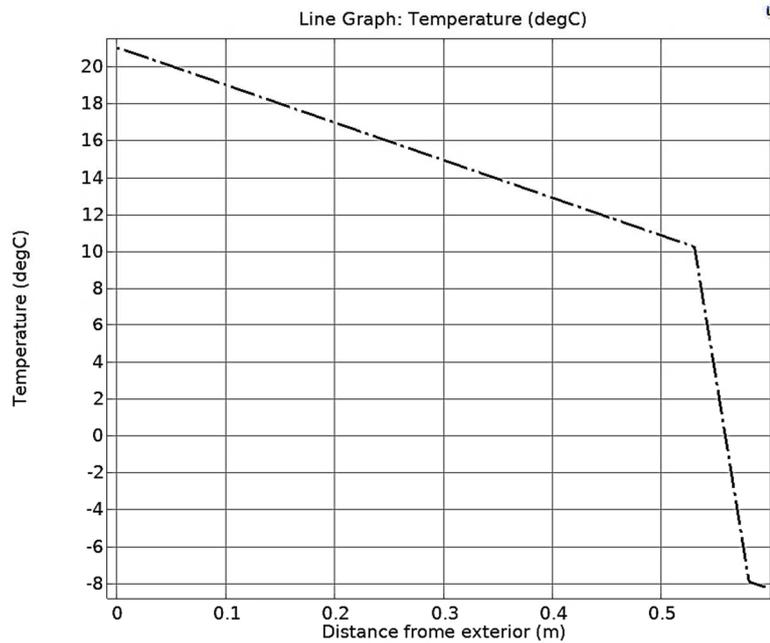
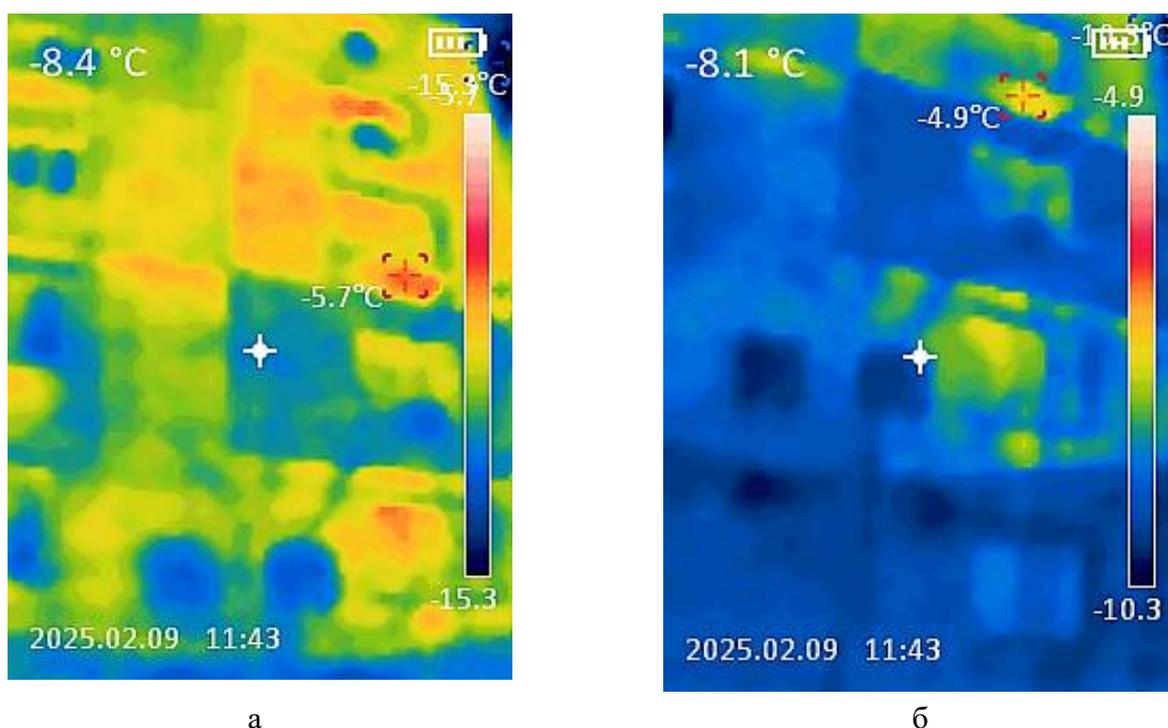


Рисунок 4.14 – Распределение температуры в сечении ограждающей конструкции 09.02.2025 г.

Внешняя термограмма тепловизионного обследования фасада здания с четырёхслойной ограждающей конструкцией представлена на рисунке 4.14.



а – стена; б – зона около окна

Рисунок 4.15 – Внешнее термограмма фасада с фрагментом утепления теплоизоляционного материала ТЕХНОФАС ПРОФ

Фактическая температура на поверхности фронтальных и торцевых стен, утепленных теплоизоляционным материалом, колеблется в пределах $-8,3...-8,4$ °C. По результатам компьютерного моделирования температура на внешней поверхности имеет значения $-8,3$ °C.

4.2.3 Ограждающая конструкция кирпичного здания с теплоизоляционным материалом IZOVOL

Конструкция наружной стены кирпичного дома со слоем теплоизоляционного материала представлена на рисунке 2.1. Данное здание находится по адресу: улице Шевченко, 18 (рисунок 4.16), в качестве утеплителя использован теплоизоляционный материал IZOVOL.



Рисунок 4.16 – Фото фасада здания

Внутренний микроклимат помещения характеризовался стабильными показателями: температура поддерживалась на уровне $T_{in} = 21 \text{ }^\circ\text{C}$, а относительная влажность воздуха составляла $\varphi_{in} = 52 \text{ } \%$. Эти параметры были тщательно зафиксированы и использованы в качестве базовых условий для дальнейшего анализа тепло- и влагопереноса через ограждающие конструкции. Параметры наружного воздуха приведены в таблице 4.1 и 4.2.

Теплофизические параметры материалов рассматриваемой стены представлены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Исходные данные для расчета

№	Параметры	Внутренняя штукатурка (цементно-песчаный раствор)	Кирпичная кладка	IZOVOL	Внешняя штукатурка (цементно-песчаный раствор)
1.	Толщина слоя, м	0,02	0,51	0,1	0,02
2.	Плотность, кг/м ³	1800	1800	120	1800
3.	Теплоемкость, кДж/(кг °С)	0,84	0,88	1	0,84
4.	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м °С)				
	- в сухом состоянии	0,76	0,7	0,035	0,76
	- во влажном состоянии	0,93	0,81	0,036	0,93
5.	Коэффициент паропроницаемости мг/(м ч·Па)	0,09	0,1	0,013	0,09
6.	Коэффициент теплообмена поверхности ограждения				
	- с внутренним воздухом, Вт/(м °С)			8,7	
	- с наружным воздухом, Вт/(м °С)			23,0	
7.	Коэффициенты аппроксимации				
	A1	0,0121	0,0123	0,0070	0,0121
	A2	-0,0178	-0,0180	-0,0103	-0,0178
	A3	0,0158	0,0161	0,0206	0,0158
	B0	0,0099	0,0238	0,000157	0,0099
	B1	0,0062	0,0199	-0,000198	0,0062

На рисунке 4.17 приведены результаты расчёта температурного поля в среднем сечении каждого слоя наружной ограждающей конструкции на протяжении года эксплуатации. На графике рисунка 4.17 визуализировано, что температура на внутренней поверхности ограждающей конструкции варьируется в диапазоне от 18,97 до 22,87 °С в течение всего периода эксперимента. Разница между температурой внутреннего воздуха и температурой внутренней поверхности конструкции находится в пределах от 1,32 до 1,89 °С. Данный температурный перепад находится в пределах значений действующих норм.

На протяжении времени с ноября по март значение температуры в середине сечения утеплителя опускается ниже точки росы, что говорит о возможности появления конденсации в третьем слое ограждающей конструкции.

На рисунке 4.18 приведены результаты моделирования температурного поля и относительной влажности в ограждающей конструкции с утеплителем IZOVOL на протяжении самого холодного месяца эксплуатации.

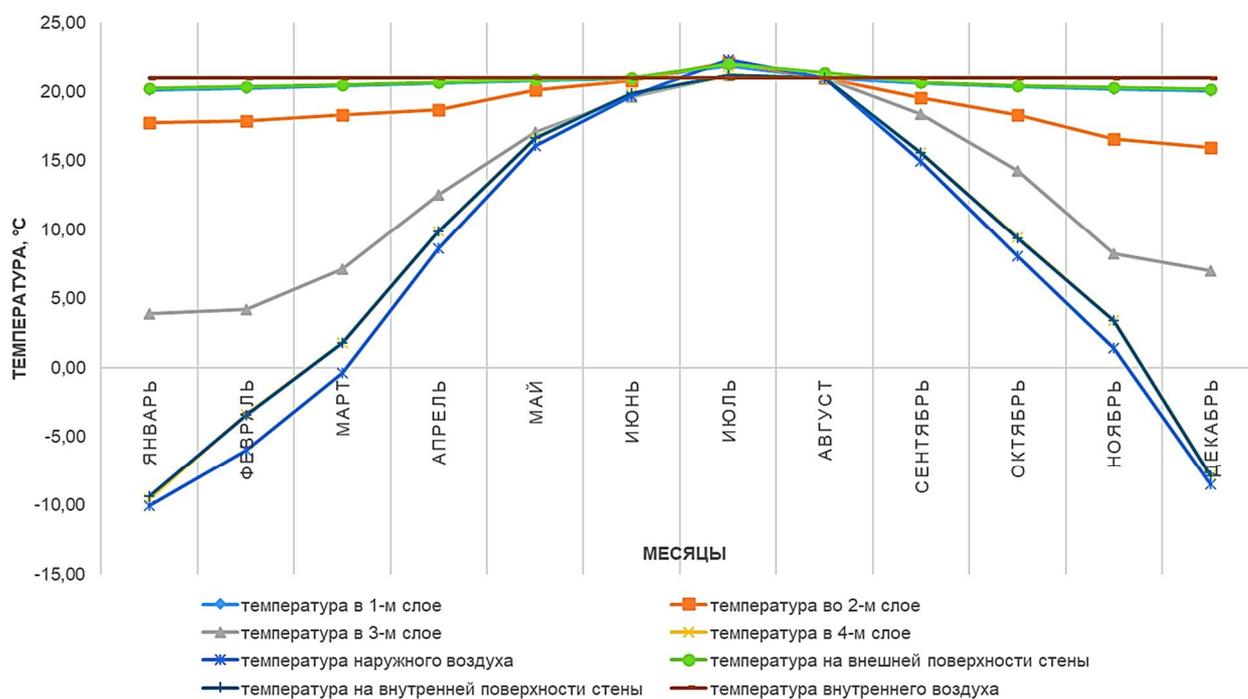


Рисунок 4.17 – Температурное поле в сечении ограждающей конструкции с утеплителем IZOVOL

В сечении кирпичной кладки (рисунок 4.18, а) температура постепенно снижается от 21 °С до 14,1 °С, а в слое теплоизоляционного материала быстро уменьшается до -11,9 °С. Относительная влажность (рисунок 4.18, б) по всей толщине кирпичной стены меняется равномерно от 52 % до 19,4 %, а в толщине утеплителя наблюдается резкий скачок величины влажности до максимального значения, а затем уменьшение до 86 %.

На рисунке 4.19 приведены изополя и графики изменения относительной влажности для угла здания. График построен для участка стены от внутреннего угла к внешнему. На графике в слое утеплителя наблюдается максимальное значения влажности 87,8 %, а затем её уменьшение до 26,1 % и равномерного повышения по толщине стены до 52 %.

В качестве примера для дальнейшего сравнения с результатами тепловизионного обследования на рисунке 4.20 представлено расчётное температурное поле в сечении ограждающей конструкции 10.02.2025 г.

Внешняя термограмма тепловизионного обследования фасада здания с четырёхслойной ограждающей конструкцией представлена на рисунке 4.21.

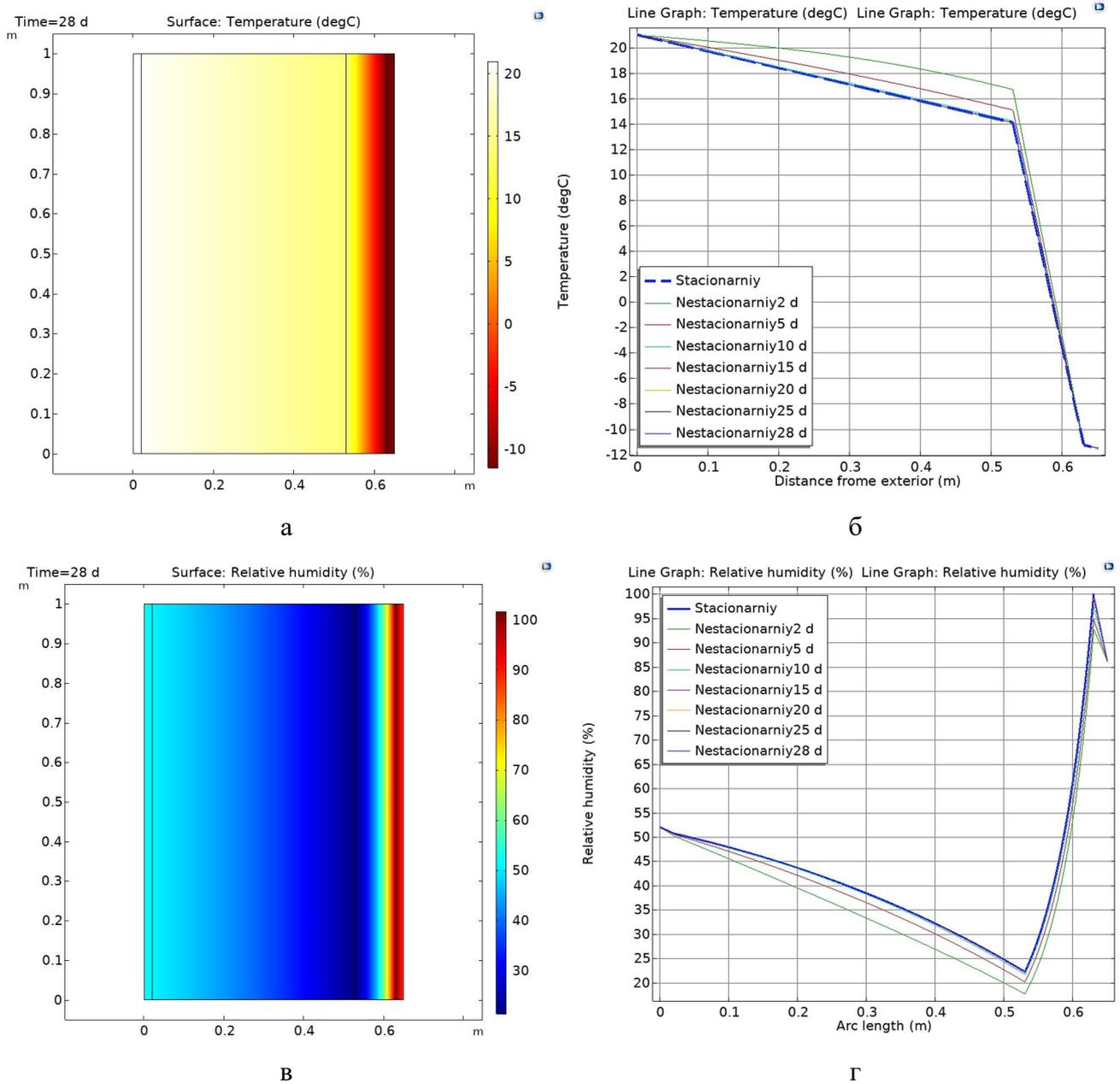
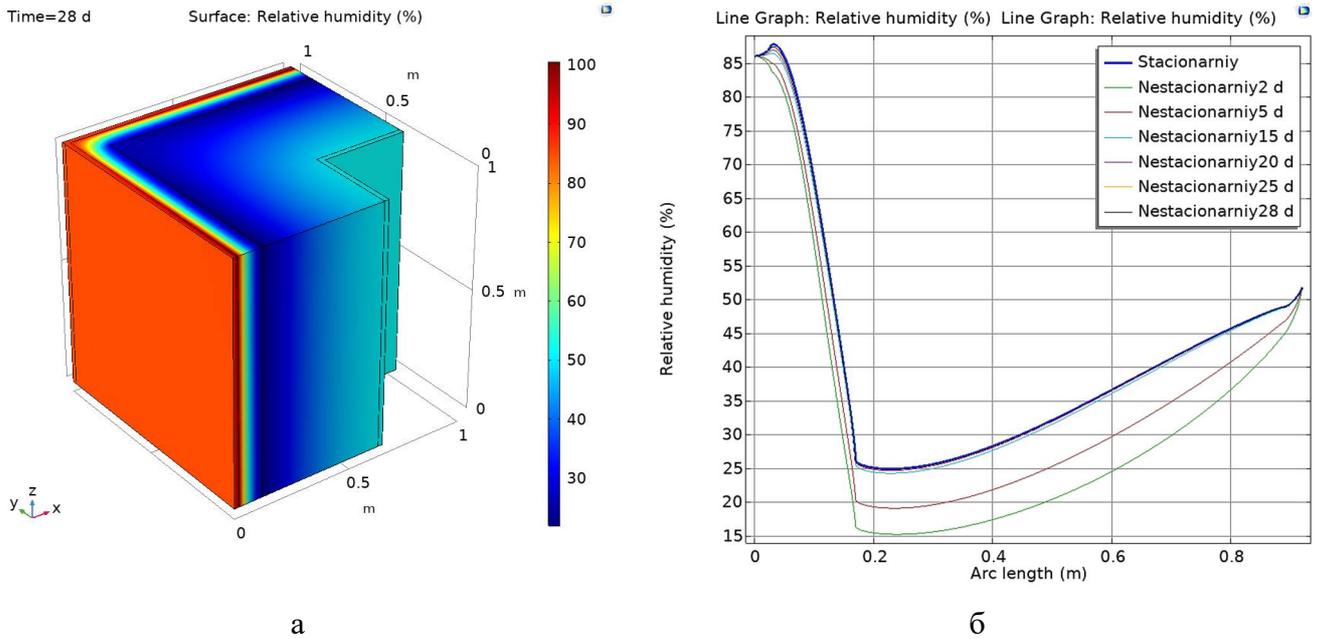


Рисунок 4.18 – Распределение температуры и относительной влажности по толщине стены



а – изополя относительной влажности, б – графики изменения влажности
 Рисунок 4.19 – Изменение относительной влажности для угла здания

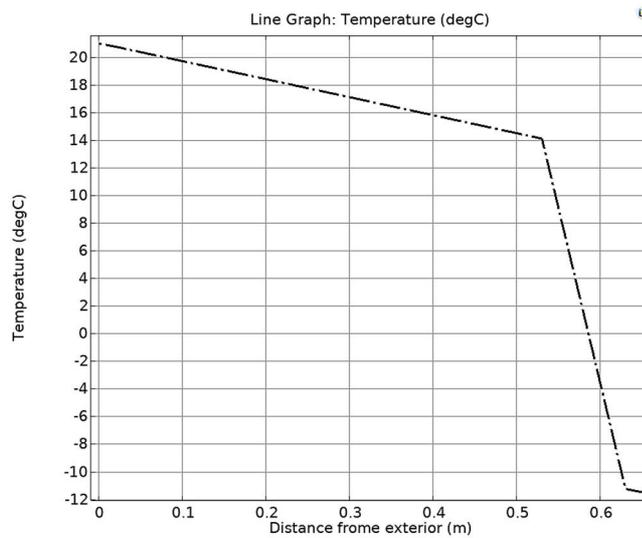
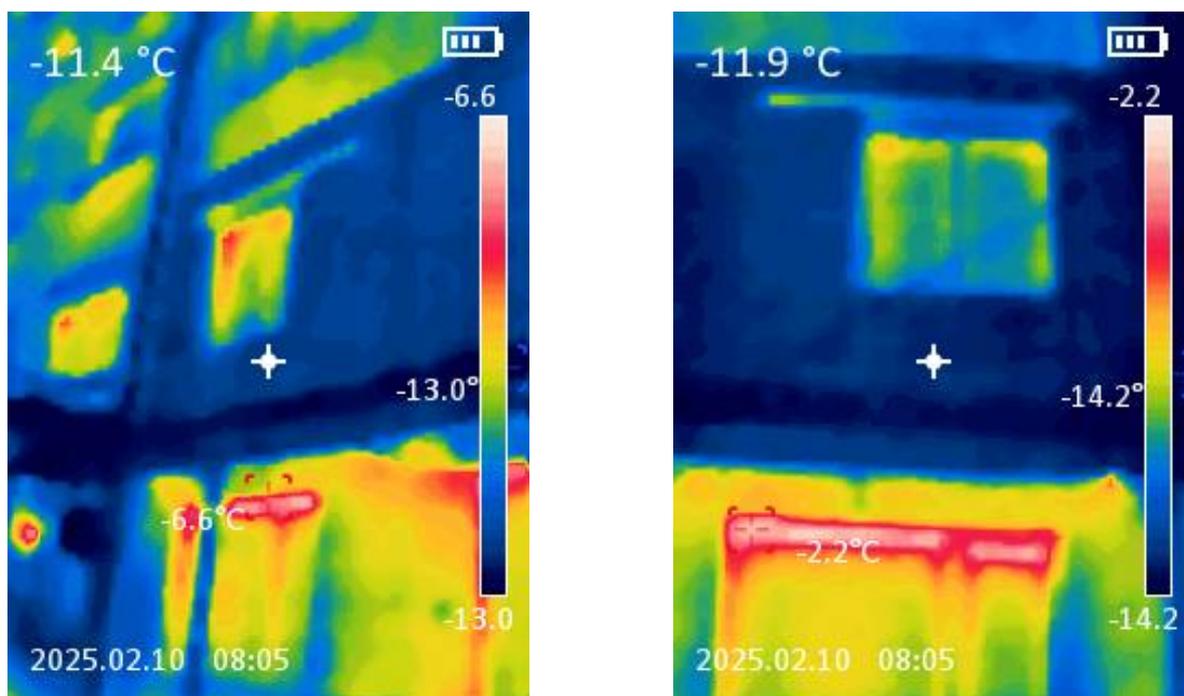


Рисунок 4.20 – Распределение температуры в сечении ограждающей конструкции
 10.02.2025 г.

Фактическая температура на поверхности фронтальных и торцевых стен, утепленных теплоизоляционным материалом, колеблется в пределах $-11,4...-11,8$ °С. По результатам компьютерного моделирования температура на внешней поверхности имеет значения $-11,5$ °С.



а

б

а – стена; б – зона стены под окном

Рисунок 4.21 – Внешняя термограмма фасада здания

4.2.4 Ограждающая конструкция панельного здания с теплоизоляционным материалом ПЕНОПЛЕКС КОМФОРТ

Конструкция наружной стены панельного дома со слоем теплоизоляционного материала представлена на рисунке 4.2. Данное здание находится по адресу: квартал Солнечный, 12 (рисунок 4.22), в качестве утеплителя использован теплоизоляционный материал ПЕНОПЛЕКС КОМФОРТ.

Температура воздуха внутри помещения принималась $T_{in} = 21 \text{ }^\circ\text{C}$, относительная влажность внутреннего воздуха $\varphi_{in} = 57 \text{ } \%$. Параметры наружного воздуха приведены в таблице 4.1 и 4.2.

Теплофизические параметры материалов рассматриваемой стены представлены в таблице 4.6.



Рисунок 4.22 – Фото фасада здания

На рисунке 4.23 приведены результаты расчёта температурного поля в среднем сечении каждого слоя наружной ограждающей конструкции на протяжении года эксплуатации.

Анализ графика (рисунок 4.23) демонстрирует, что температура на внутренней поверхности ограждающей конструкции варьируется в диапазоне от 18,75 до 21,84 °С в течение всего периода эксперимента. Разница между температурой внутреннего воздуха и температурой внутренней поверхности конструкции находится в пределах от 1,75 до 2,36 °С. Важно отметить, что этот перепад не выходит за рамки установленных нормативных требований.

Таблица 4.6 – Исходные данные для расчёта

№	Параметры	Внутренняя штукатурка (цементно-песчаный раствор)	Бетонная (керамзитобетонная) стена	Пеноплекс КОМФОРТ	Внешняя штукатурка (цементно-песчаный раствор)
1.	Толщина слоя, м	0,02	0,25	0,10	0,02
2.	Плотность, кг/м ³	1800	1800	30	1800
3.	Теплоемкость, кДж/(кг °С)	0,84	0,84	1	0,84
4.	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м °С) - в сухом состоянии - во влажном состоянии	0,76 0,93	0,80 0,92	0,034 0,0348	0,76 0,93
5.	Коэффициент паропроницаемости мг/(м ч Па)	0,09	0,09	0,013	0,09
6.	Коэффициент теплообмена поверхности ограждения - с внутренним воздухом, Вт/(м °С) - с наружным воздухом, Вт/(м °С)	8,7 23,0			
7.	Коэффициенты аппроксимации				
	A1	0,0121	0,0128	0,0245	0,0121
	A2	-0,0178	-0,0187	-0,0320	-0,0178
	A3	0,0158	0,0167	0,0260	0,0158
	B0	0,0099	0,0235	0,000157	0,0099
	B1	0,0062	0,0207	-0,000198	0,0062

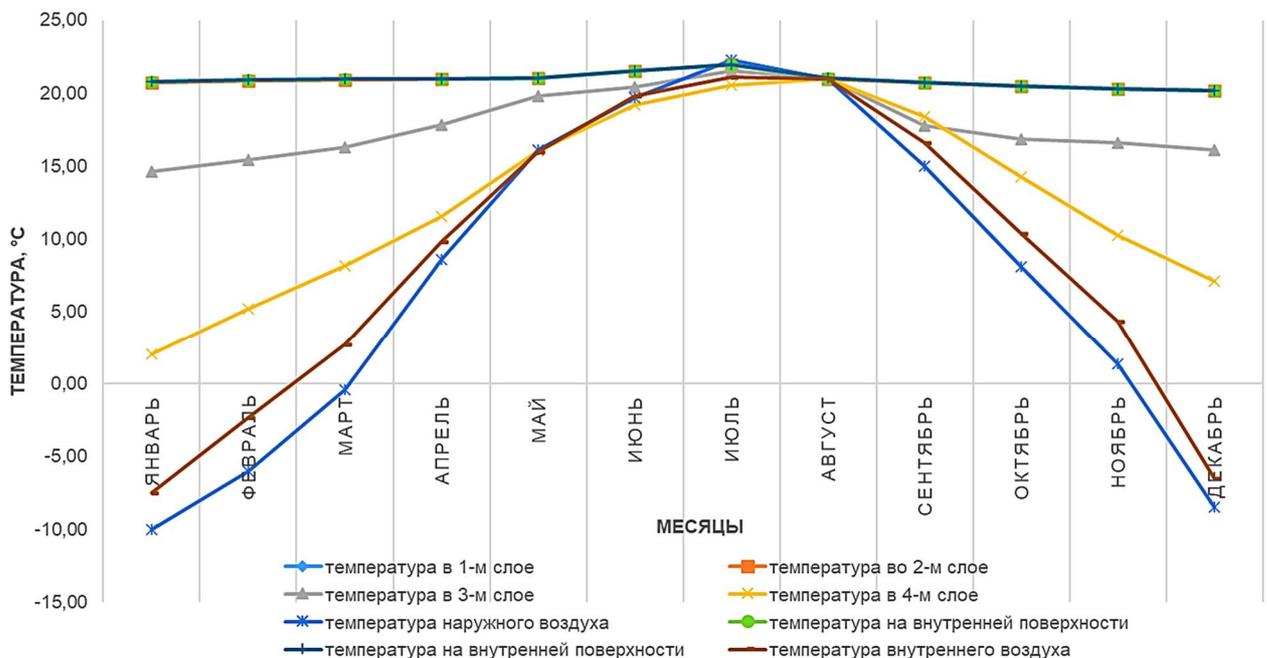


Рисунок 4.23 – Температурное поле в сечении ограждающей конструкции с утеплителем ПЕНОПЛЕКС КОМФОРТ

На рисунке 4.24 приведены результаты моделирования температурного поля и относительной влажности в ограждающей конструкции с утеплителем ПЕНОПЛЕКС КОМФОРТ на протяжении самого холодного месяца эксплуатации.

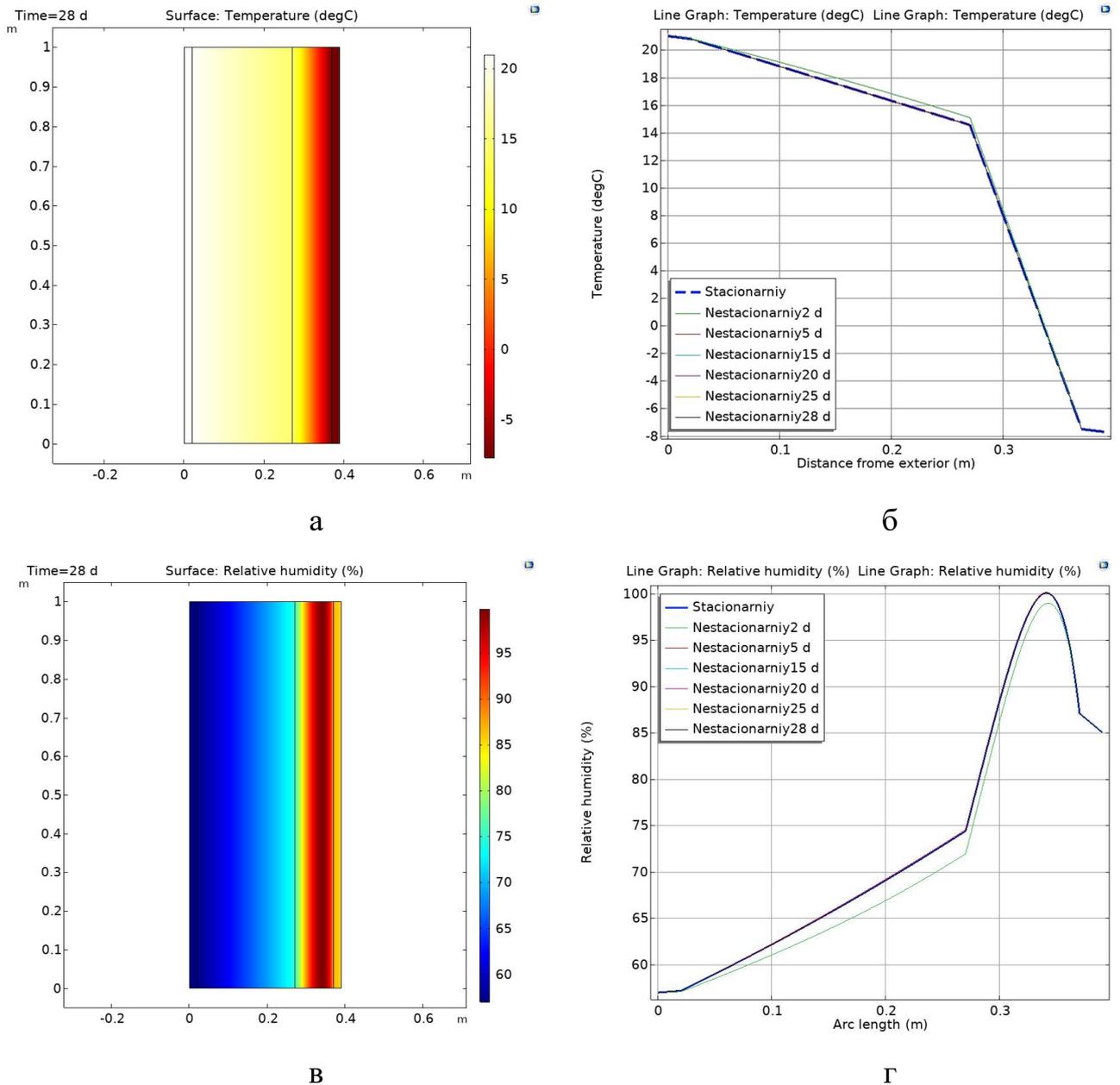
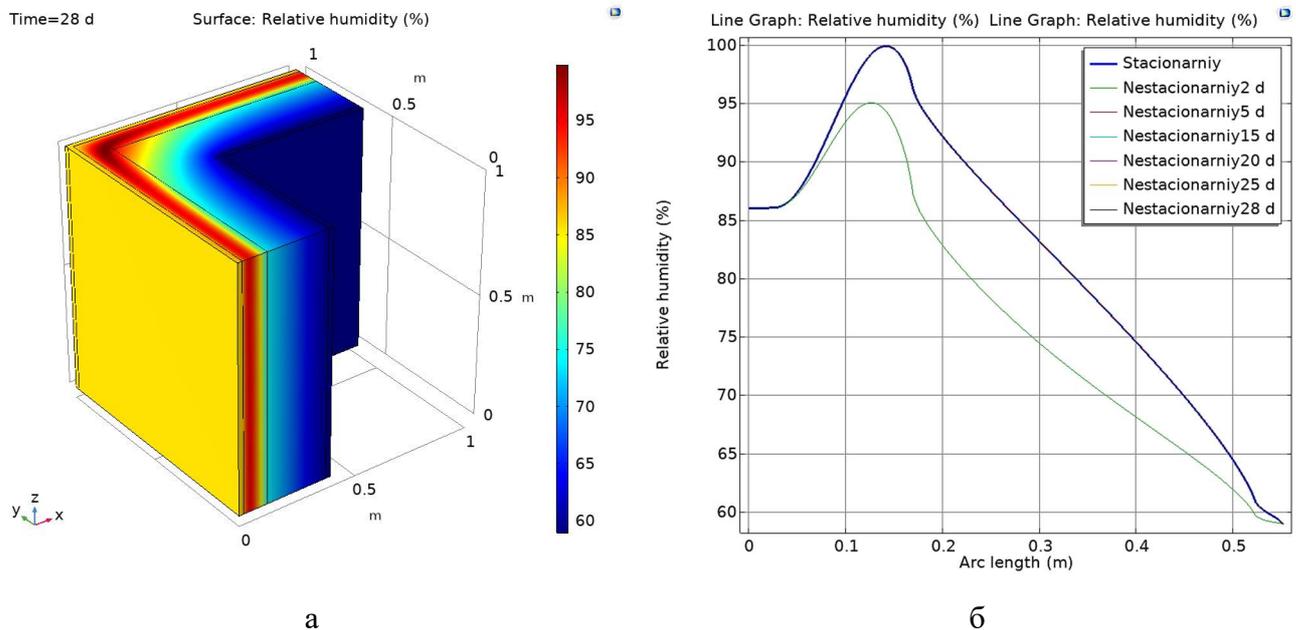


Рисунок 4.24 – Распределение температуры и относительной влажности по толщине стены

В сечении панельной стены (рисунок 4.24, а) температура постепенно снижается от 21 °С до 14,2 °С, а в слое теплоизоляционного материала быстро уменьшается до -7,8 °С. Относительная влажность (рисунок 4.24, б) по всей толщине панельной стены меняется равномерно от 57 % до 78,3 %, а в толщине утеплителя наблюдается резкий скачок величины влажности до максимального значения, а затем уменьшение до 86 %.

На рисунке 4.25 приведены изополя и графики изменения относительной влажности для угла здания. График построен для участка стены от внутреннего угла к внешнему. На графике в слое утеплителя наблюдается максимальное значения влажности, а затем её уменьшение до 90 % и равномерного понижения по толщине стены до 57 %.

В качестве примера для дальнейшего сравнения с результатами тепловизионного обследования на рисунке 4.26 представлено расчётное температурное поле в сечении ограждающей конструкции 07.02.2025 г.



а – изополя относительной влажности, б – графики изменения влажности

Рисунок 4.25 – Изменение относительной влажности для угла здания

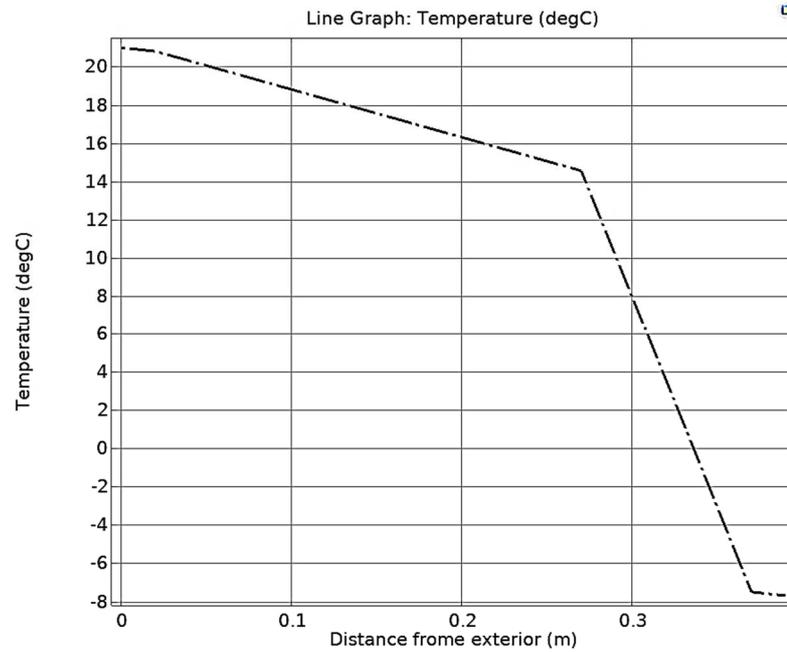
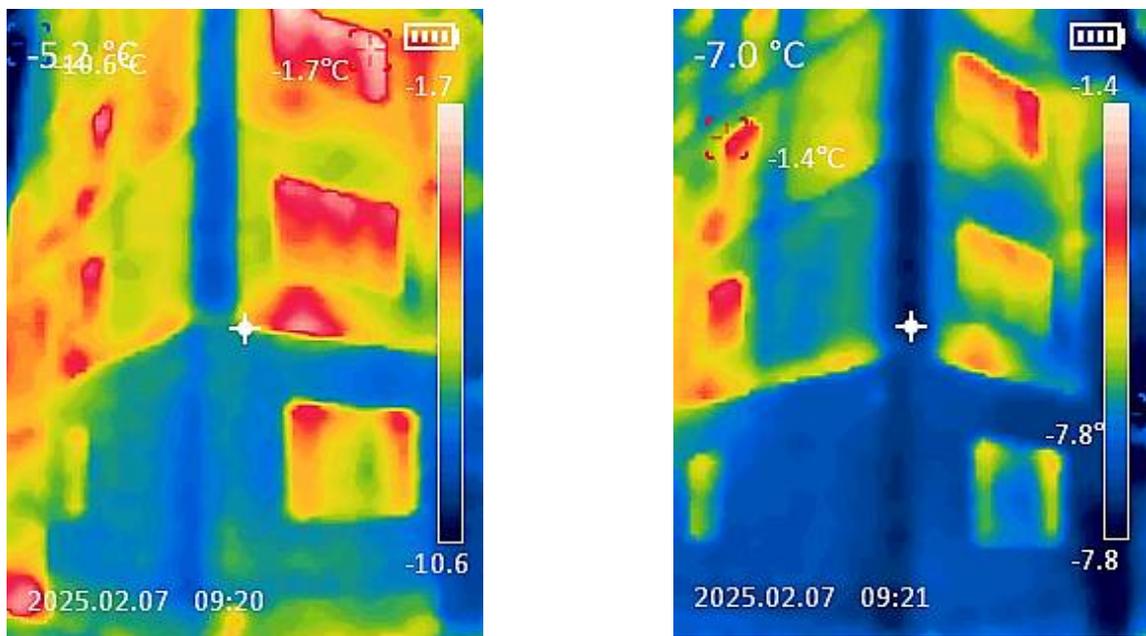


Рисунок 4.26 – Распределение температуры в сечении ограждающей конструкции
07.02.2025 г.

Внешняя термограмма тепловизионного обследования фасада здания с четырёхслойной ограждающей конструкцией представлена на рисунке 4.27.



а
б
а – стена здания; б – фрагмент угла здания

Рисунок 4.27 – Внешняя термограмма фасада здания

Фактическая температура на поверхности фронтальных и торцевых стен, утепленных теплоизоляционным материалом, колеблется в пределах $-7,65...-7,71$ °С. По результатам компьютерного моделирования температура на внешней поверхности имеет значения $-7,7$ °С.

4.2.5 Ограждающая конструкция панельного здания с теплоизоляционным материалом ТЕХНОФАС ПРОФ

Конструкция наружной стены панельного дома со слоем теплоизоляционного материала представлена на рисунке 4.2. Данное здание находится по адресу: улица газеты Луганская правда 147 (рисунок 4.28), в качестве утеплителя использован теплоизоляционный материал ТЕХНОФАС ПРОФ.

Температура воздуха внутри помещения принималась $T_{in} = 21$ °С, относительная влажность внутреннего воздуха $\varphi_{in} = 54$ %. Параметры наружного воздуха приведены в таблице 4.1 и 4.2.



Рисунок 4.28 – Фото фасада здания

Теплофизические параметры материалов рассматриваемой стены представлены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Исходные данные для расчета

№	Параметры	Внутренняя штукатурка (цементно-песчаный раствор)	Бетонная (керамзито-бетонная) стена	ТЕХНОФАС ПРОФ	Внешняя штукатурка (цементно-песчаный раствор)
1.	Толщина слоя, м	0,02	0,25	0,05	0,02
2.	Плотность, кг/м ³	1800	1800	155	1800
3.	Теплоемкость, кДж/(кг °С)	0,84	0,84	1	0,84
4.	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м °С)				
	- в сухом состоянии	0,76	0,80	0,038	0,76
	- во влажном состоянии	0,93	0,92	0,0392	0,93
5.	Коэффициент паропроницаемости мг/(м ч·Па)	0,09	0,09	0,013	0,09
6.	Коэффициент теплообмена поверхности ограждения				
	- с внутренним воздухом, Вт/(м °С)			8,7	
	- с наружным воздухом, Вт/(м °С)			23,0	
7.	Коэффициенты аппроксимации				
	A1	0,0121	0,0128	0,0065	0,0121
	A2	-0,0178	-0,0187	-0,0097	-0,0178
	A3	0,0158	0,0167	0,0195	0,0158
	B0	0,0099	0,0235	0,000157	0,0099
	B1	0,0062	0,0207	-0,000198	0,0062

На рисунке 4.29 приведены результаты расчёта температурного поля в среднем сечении каждого слоя наружной ограждающей конструкции на протяжении года эксплуатации.

Анализ графика (рисунок 4.29) демонстрирует, что температура на внутренней поверхности ограждающей конструкции варьируется в диапазоне от 20,53 до 21,58 °С в течение всего периода эксперимента. Разница между температурой внутреннего воздуха и температурой внутренней поверхности конструкции находится в пределах от 1,4 до 2,05 °С. Важно отметить, что этот перепад не выходит за рамки установленных нормативных требований.

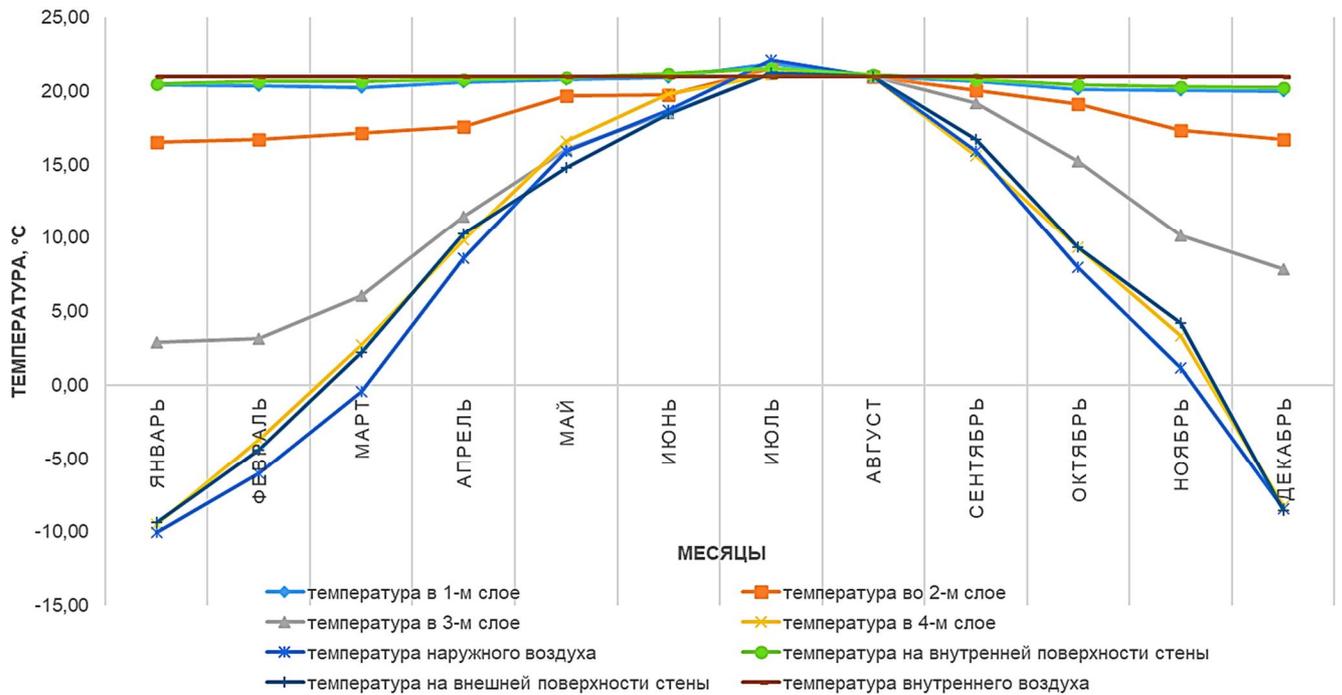
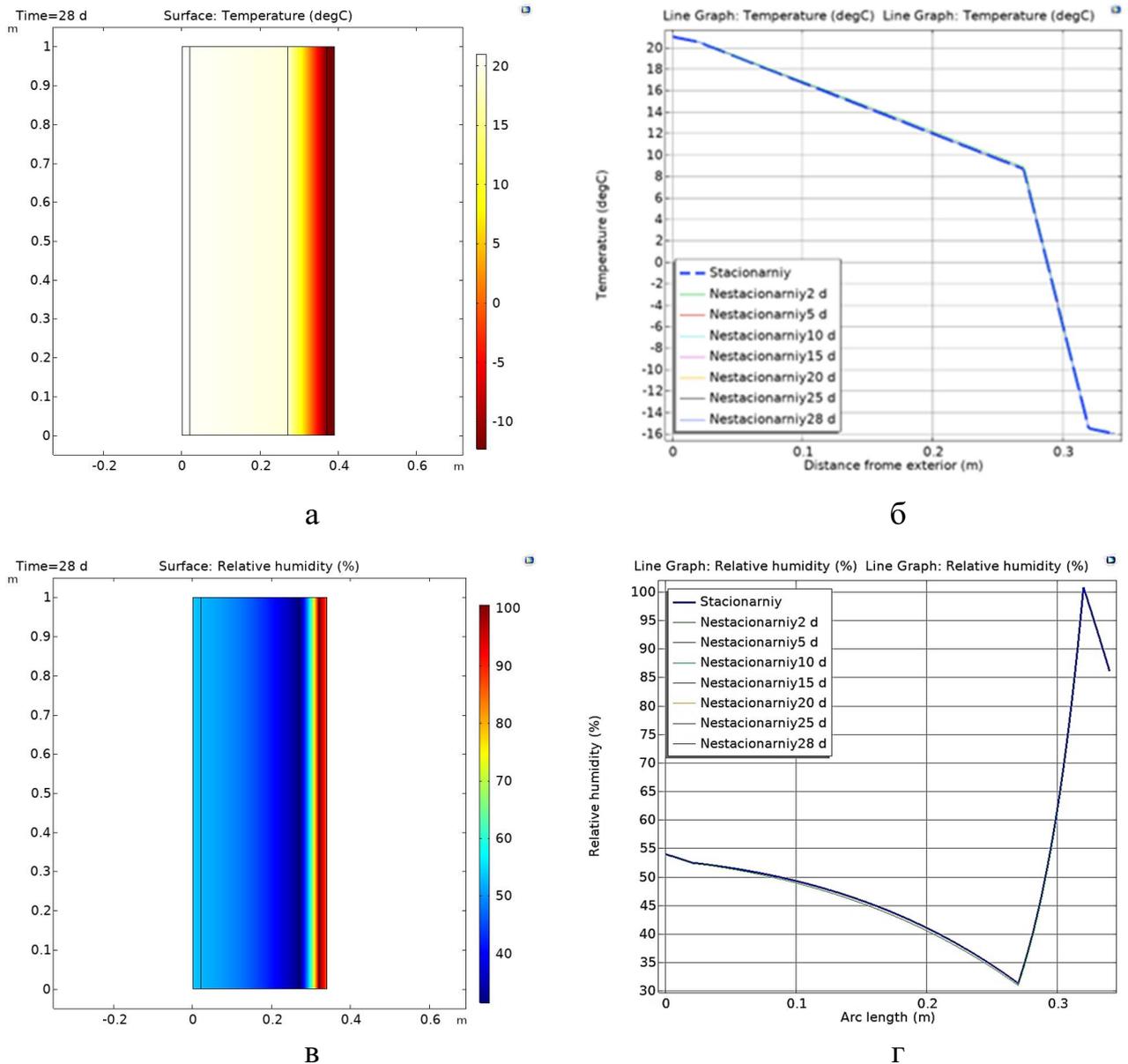


Рисунок 4.29 – Температурное поле в сечении ограждающей конструкции с утеплителем ТЕХНОФАС ПРОФ

Таким образом, полученные данные свидетельствуют о том, что условия для образования конденсата на внутренней поверхности конструкции не возникают, что является важным фактором для обеспечения долговечности и эксплуатационной надежности здания. В осенне-весенний период температура в середине утеплителя опускается ниже точки росы $11,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, что говорит о возможности появления влаги в этом слое.

На рисунке 4.30 приведены результаты моделирования температурного поля и относительной влажности в ограждающей конструкции с утеплителем ТЕХНОФАС ПРОФ на протяжении самого холодного месяца эксплуатации.

В сечении панельной стены (рисунок 4.30, а) температура постепенно снижается от $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $8,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, а в слое теплоизоляционного материала быстро уменьшается до $-15,9\text{ }^{\circ}\text{C}$. Относительная влажность (рисунок 4.30, б) по всей толщине панельной стены меняется равномерно от $55\text{ }\%$ до $32,4\text{ }\%$, а в толщине утеплителя наблюдается резкий скачок величины влажности до максимального значения, а затем уменьшение до $86\text{ }\%$.



а – изополя температуры; б – графики изменения температуры;

в – изополя относительной влажности;

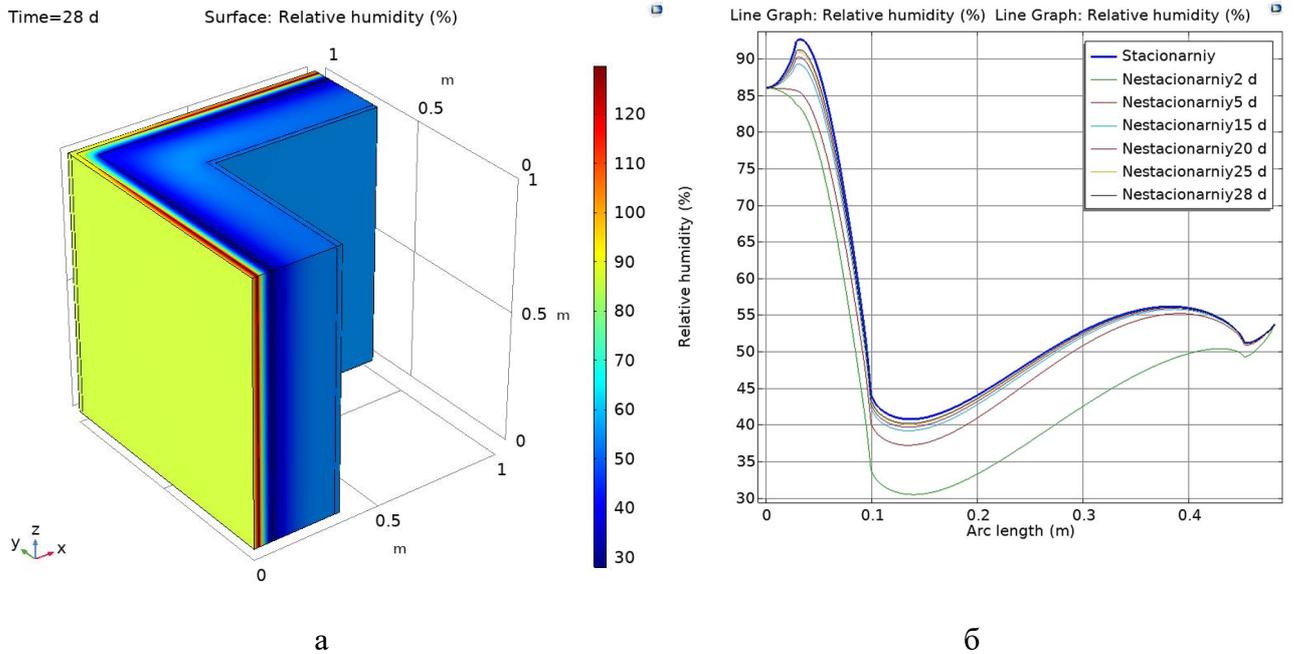
г – графики изменения относительной влажности

Рисунок 4.30 – Распределение температуры и относительной влажности по толщине стены

На рисунке 4.31 приведены изополя и графики изменения относительной влажности для угла здания. График построен для участка стены от внутреннего угла к внешнему. На графике в слое утеплителя наблюдается максимальное

значения влажности 92,9 %, а затем её уменьшение до 42,4 % и равномерного понижения по толщине стены до 55 %.

В качестве примера для дальнейшего сравнения с результатами тепловизионного обследования на рисунке 4.32 представлено расчётное температурное поле в сечении ограждающей конструкции 19.02.2025 г.



а – изополя относительной влажности, б – графики изменения влажности

Рисунок 4.31 – Изменение относительной влажности для угла здания

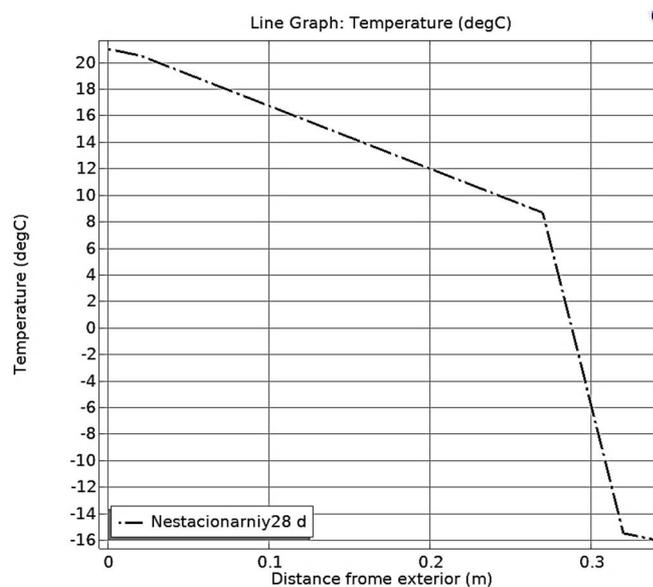
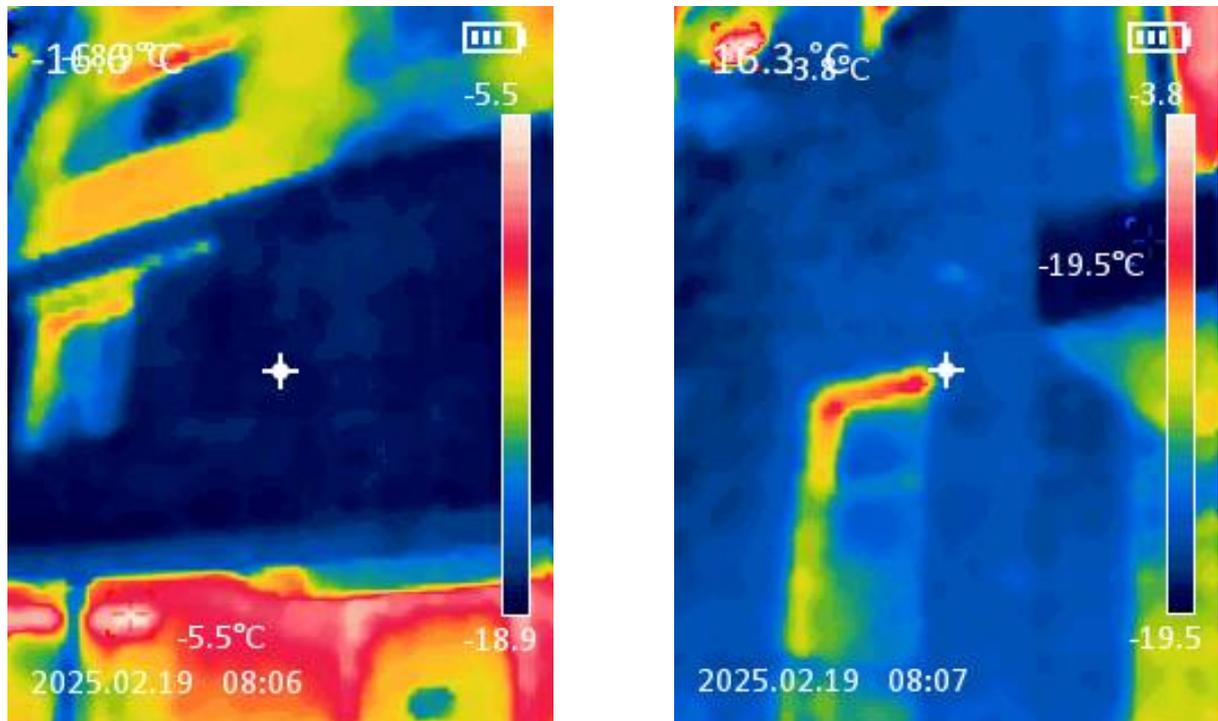


Рисунок 4.32 – Распределение температуры в сечении ограждающей конструкции

19.02.2025 г.

Внешняя термограмма тепловизионного обследования фасада здания с четырёхслойной ограждающей конструкцией представлена на рисунке 4.33.



а

б

а – фрагмент угла здания; б – стена здания

Рисунок 4.33 – Внешняя термограмма фасада здания

Фактическая температура на поверхности фронтальных и торцевых стен, утепленных теплоизоляционным материалом, колеблется в пределах $-16,71...-16,73$ °С. По результатам компьютерного моделирования температура на внешней поверхности имеет значения $-16,6$ °С.

4.2.6 Ограждающая конструкция панельного здания с теплоизоляционным материалом IZOVOL

Конструкция наружной стены панельного дома со слоем теплоизоляционного материала представлена на рисунке 4.2. Данное здание

находится по адресу: квартал Комарова, 25 (рисунок 4.34), в качестве утеплителя использован теплоизоляционный материал IZOVOL.

Температура воздуха внутри помещения принималась $T_{in} = 21 \text{ }^\circ\text{C}$, относительная влажность внутреннего воздуха $\varphi_{in} = 54 \text{ } \%$. Параметры наружного воздуха приведены в таблице 4.1 и 4.2.



Рисунок 4.34 – Фото фасада здания

Теплофизические параметры материалов рассматриваемой стены представлены в таблице 4.8.

На рисунке 4.35 приведены результаты расчёта температурного поля в среднем сечении каждого слоя наружной ограждающей конструкции на протяжении года эксплуатации.

Анализ результатов построенного графика (рисунок 4.35) демонстрирует, что температура на внутренней поверхности ограждающей конструкции варьируется в диапазоне от 18.23 до 21,44 $^\circ\text{C}$ в течение всего периода эксперимента. Разница между температурой внутреннего воздуха и температурой внутренней поверхности

конструкции находится в пределах от 1,35 °С до 2,16 °С, что говорит об отсутствии образования конденсата на внутренней поверхности конструкции.

Таблица 4.8 – Исходные данные для расчёта

№	Параметры	Внутренняя штукатурка (цементно-песчаный раствор)	Бетонная (керамзито-бетонная) стена	IZOVOL	Внешняя штукатурка (цементно-песчаный раствор)
1.	Толщина слоя, м	0,02	0,25	0,1	0,02
2.	Плотность, кг/м ³	1800	1800	100	1800
3.	Теплоемкость, кДж/(кг °С)	0,84	0,84	1	0,84
4.	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м °С) - в сухом состоянии - во влажном состоянии	0,76 0,93	0,80 0,92	0,035 0,036	0,76 0,93
5.	Коэффициент паропроницаемости мг/(м ч·Па)	0,09	0,09	0,013	0,09
6.	Коэффициент теплообмена поверхности ограждения - с внутренним воздухом, Вт/(м °С) - с наружным воздухом, Вт/(м °С)	8,7 23,0			
7.	Коэффициенты аппроксимации				
	A1	0,0121	0,0128	0,0070	0,0121
	A2	-0,0178	-0,0187	-0,0103	-0,0178
	A3	0,0158	0,0167	0,0206	0,0158
	B0	0,0099	0,0235	0,000157	0,0099
	B1	0,0062	0,0207	-0,000198	0,0062

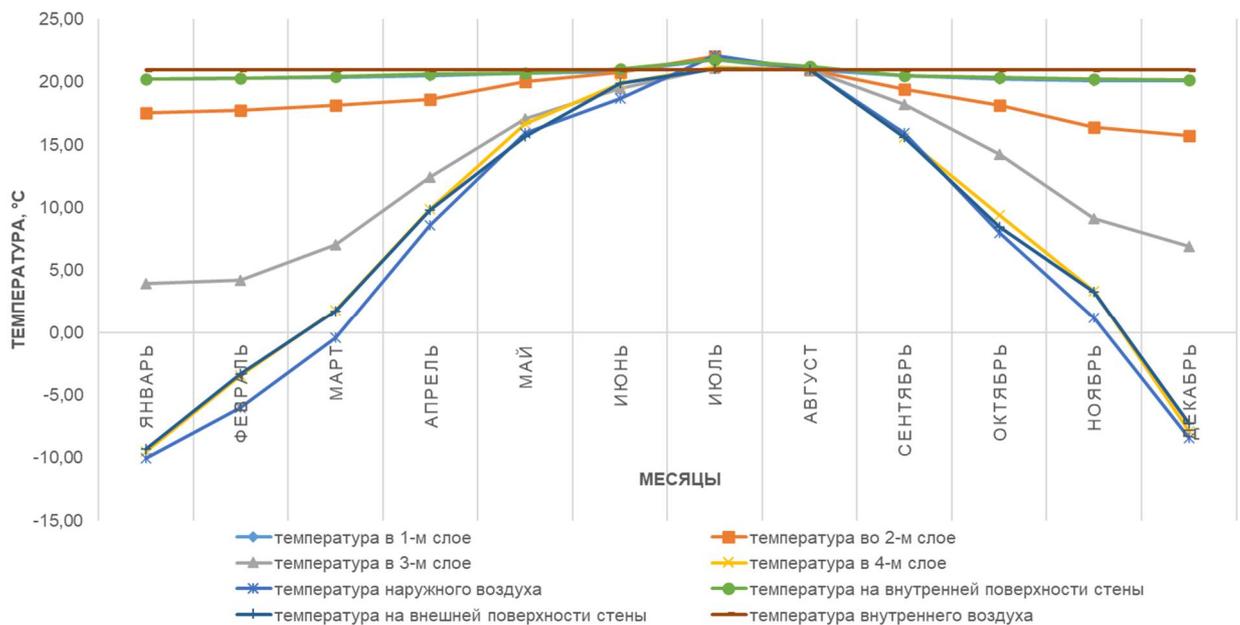
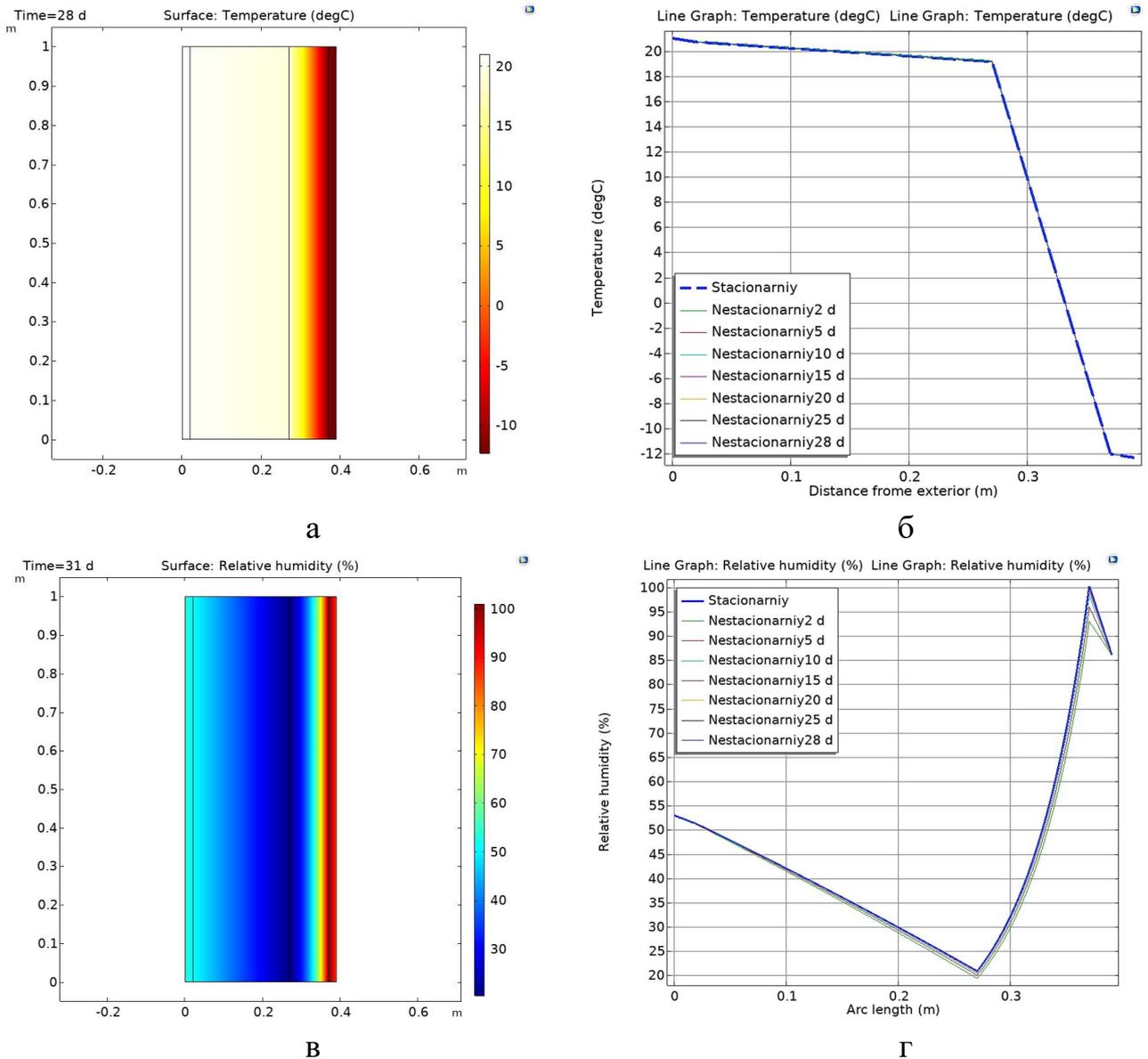


Рисунок 4.35 – График изменения температурного поля в сечении ограждающей конструкции с утеплителем IZOVOL

На рисунке 4.36 приведены результаты моделирования температурного поля и относительной влажности в ограждающей конструкции с утеплителем IZOVOL на протяжении самого холодного месяца эксплуатации.

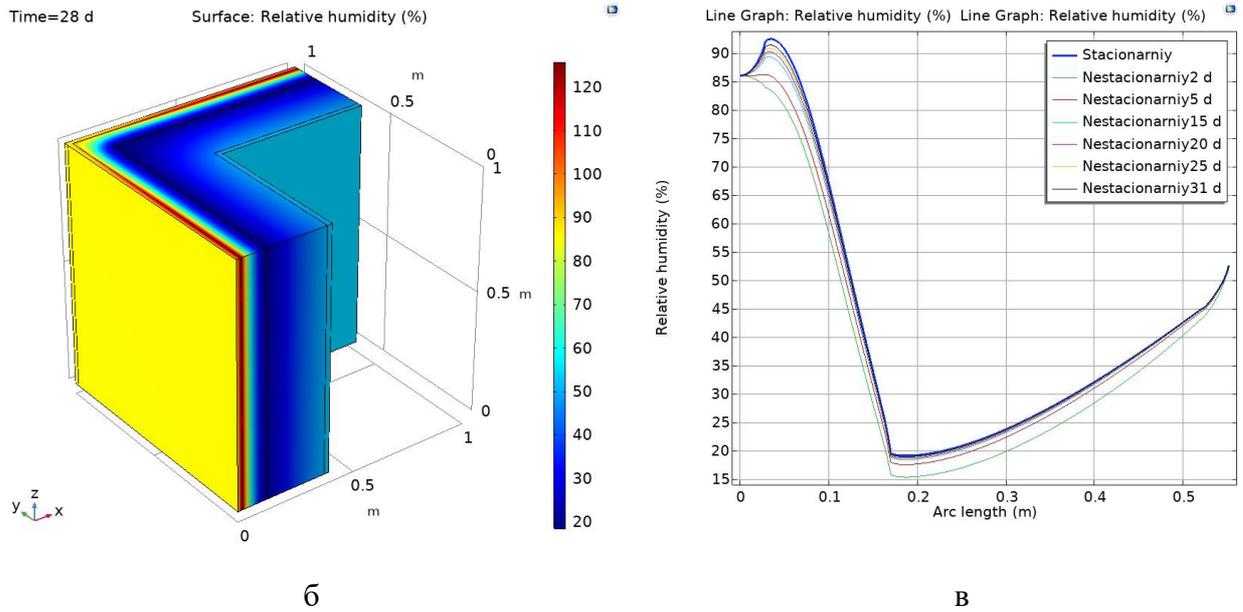


а – изополя температуры; б – графики изменения температуры;

в – изополя относительной влажности;

г – графики изменения относительной влажности

Рисунок 4.36 – Распределение температуры и относительной влажности по толщине стены



а – изополя относительной влажности, б – графики изменения влажности

Рисунок 4.37 – Изменение относительной влажности для угла здания

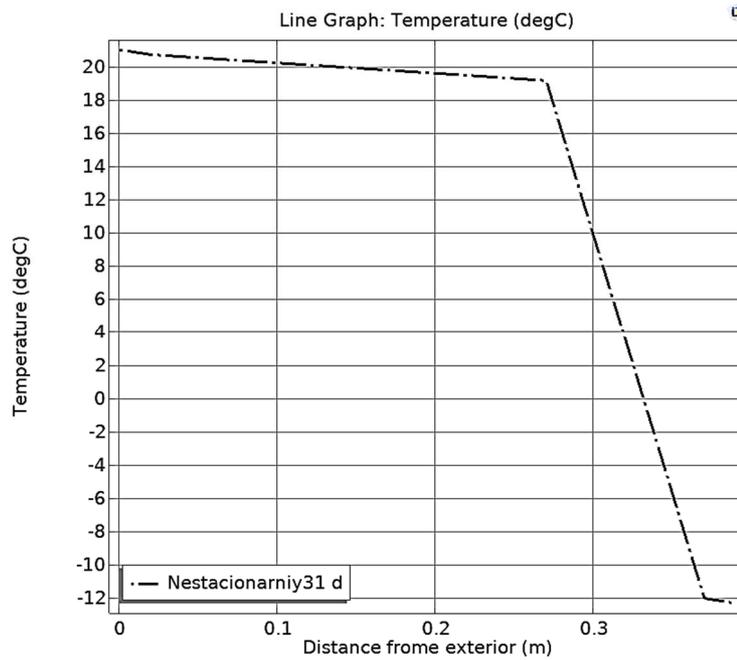
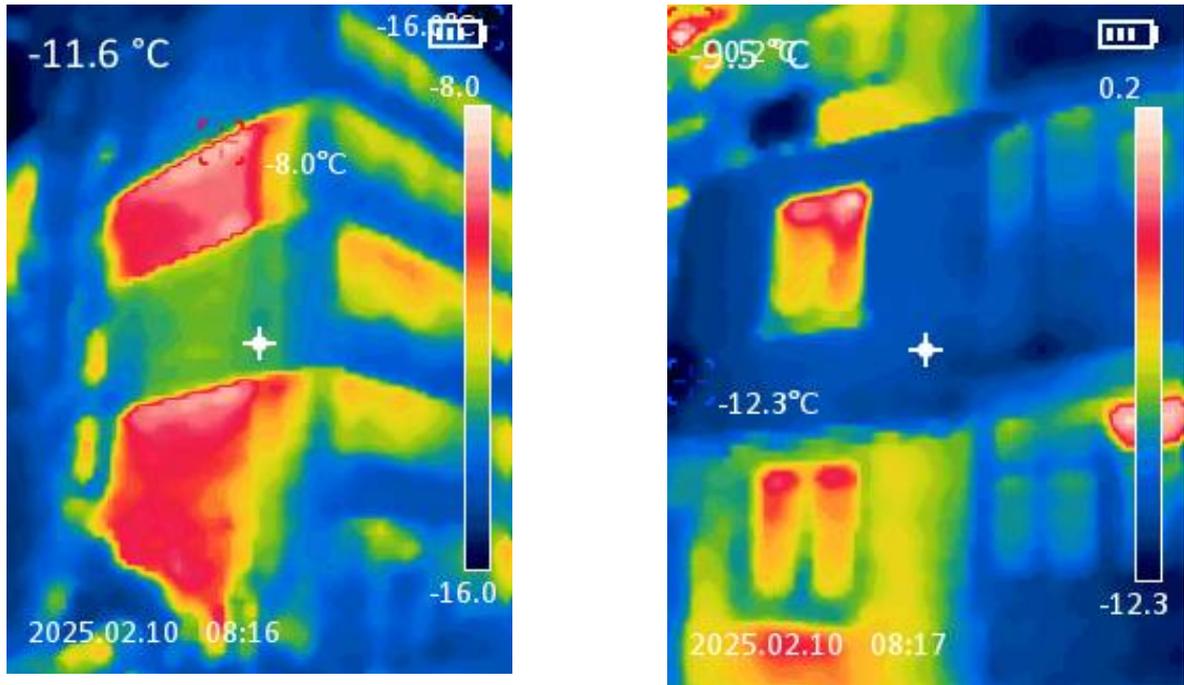


Рисунок 4.38 – Распределение температуры в сечении ограждающей конструкции
10.02.2025 г.

Внешняя термограмма тепловизионного обследования фасада здания с четырёхслойной ограждающей конструкцией представлена на рисунке 4.39.



а

б

а – фрагмент угла здания; б – стена здания

Рисунок 4.39 – Внешняя термограмма фасада здания

Фактическая температура на поверхности фронтальных и торцевых стен, утепленных теплоизоляционным материалом, колеблется в пределах $-11,8...-12,1$ °С. По результатам компьютерного моделирования температура на внешней поверхности имеет значения $-11,9$ °С.

4.2.7 Ограждающая конструкция кирпичного здания с вентилируемым фасадом и теплоизоляционным материалом ПЕНОПЛЕКС КОМФОРТ

Вентилируемые фасады с воздушной прослойкой представляют собой передовое инженерное решение, обеспечивающее не только эстетическую привлекательность здания, но и существенное улучшение его эксплуатационных характеристик. Эта технология является ярким примером сочетания инновационных материалов и продуманного конструктивного подхода, направленного на создание комфортной и энергоэффективной среды обитания.

Конструкция вентилируемого фасада включает в себя несколько ключевых элементов, каждый из которых выполняет свою определенную функцию. Несущий каркас, выполненный из металла или композитных материалов, обеспечивает надежную основу для крепления облицовочных панелей. Теплоизоляционный слой, расположенный между каркасом и стеной здания, минимизирует теплопотери в холодное время года и предотвращает перегрев в летний период.

Особое значение имеет воздушная прослойка, расположенная между облицовочным материалом и теплоизоляцией. Эта прослойка обеспечивает естественную циркуляцию воздуха, что способствует удалению избыточной влаги из конструкции и предотвращает образование конденсата. Благодаря этому, срок службы здания значительно увеличивается, а затраты на его эксплуатацию сокращаются.

Вентилируемые фасады с воздушной прослойкой – это не только эффективное, но и экологически безопасное решение. Использование современных материалов и технологий позволяет создавать фасады, отвечающие самым высоким требованиям в области энергосбережения и защиты окружающей среды. Это делает их идеальным выбором для строительства и реконструкции зданий различного назначения.

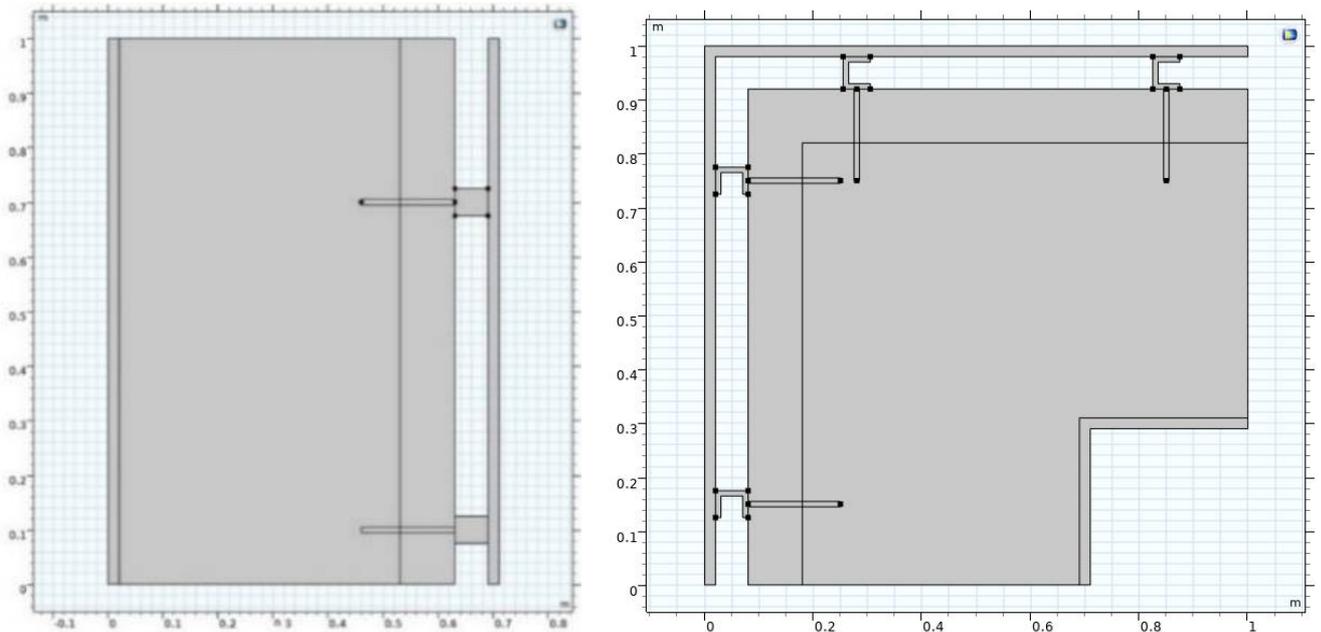
Для вентилируемых фасадов в г. Луганске в основном применяют для облицовки плитку из алюминия. Алюминиевая плитка для вентилируемого фасада – это воплощение современных технологий и эстетического совершенства, предлагающее не только визуальную привлекательность, но и исключительные эксплуатационные характеристики. Этот материал, сочетающий в себе легкость алюминия и прочность керамики, становится все более востребованным в архитектурных проектах, стремящихся к долговечности, энергоэффективности и выразительности.

Благодаря своей малой массе, алюминиевая плитка значительно снижает нагрузку на несущие конструкции здания, что облегчает монтаж и снижает затраты на строительство. В то же время, высокая прочность и устойчивость к коррозии обеспечивают долговечность фасада, сохраняя его первозданный вид на долгие

годы. Широкий выбор цветов и текстур позволяет создавать уникальные дизайнерские решения, подчеркивающие индивидуальность каждого проекта.

Кроме того, алюминиевая плитка является экологически чистым материалом, пригодным для вторичной переработки, что делает ее привлекательным выбором для проектов, ориентированных на устойчивое развитие. Ее огнестойкость и устойчивость к воздействию ультрафиолетового излучения обеспечивают безопасность и долговечность фасада в любых климатических условиях.

Конструкция наружной стены панельного дома с вентилируемым фасадом со слоем теплоизоляционного материала представлена на рисунке 4.40. Данное здание находится по адресу: улица газеты Луганская правда 151 (рисунок 4.41), в качестве утеплителя использован теплоизоляционный материал ПЕНОПЛЕКС КОМФОРТ, а облицовочный слой выполнен в виде алюминиевой плитки.



1 – штукатурный слой известковой штукатурки, 2 – кирпичная стена, 3 – теплоизоляционный материал, 4 – вентиляционная прослойка, 5 – облицовочный слой (алюминиевая плитка)

Рисунок 4.40 – Схема ограждающей конструкции

Утеплитель ПЕНОПЛЕКС КОМФОРТ крепится к несущей стены с помощью анкеров. Металлические анкеры в вентилируемом фасаде несут двойную

ответственность. Во-первых, они должны надежно закрепить теплоизоляционный слой, защищая здание от теплопотерь и обеспечивая комфортный микроклимат внутри. Во-вторых, они должны выдержать вес облицовочного материала, будь то керамогранит, алюминиевые композитные панели или натуральный камень, сохраняя эстетичный внешний вид здания.

Предотвращение проникновения влаги в анкерные соединения – задача, требующая комплексного подхода. Необходимо тщательно выбирать материалы анкеров, уделять особое внимание антикоррозионной защите, обеспечивать надежную герметизацию узлов и правильно выполнять монтаж.

Температура воздуха внутри помещения принималась $T_{in} = 21 \text{ }^\circ\text{C}$, относительная влажность внутреннего воздуха $\phi_{in} = 58 \text{ } \%$. Параметры наружного воздуха приведены в таблице 4.1 и 4.2.

Теплофизические параметры материалов рассматриваемой стены представлены в таблице 4.9.



Рисунок 4.41 – Фото фасада здания

Таблица 4.9 – Исходные данные для расчета

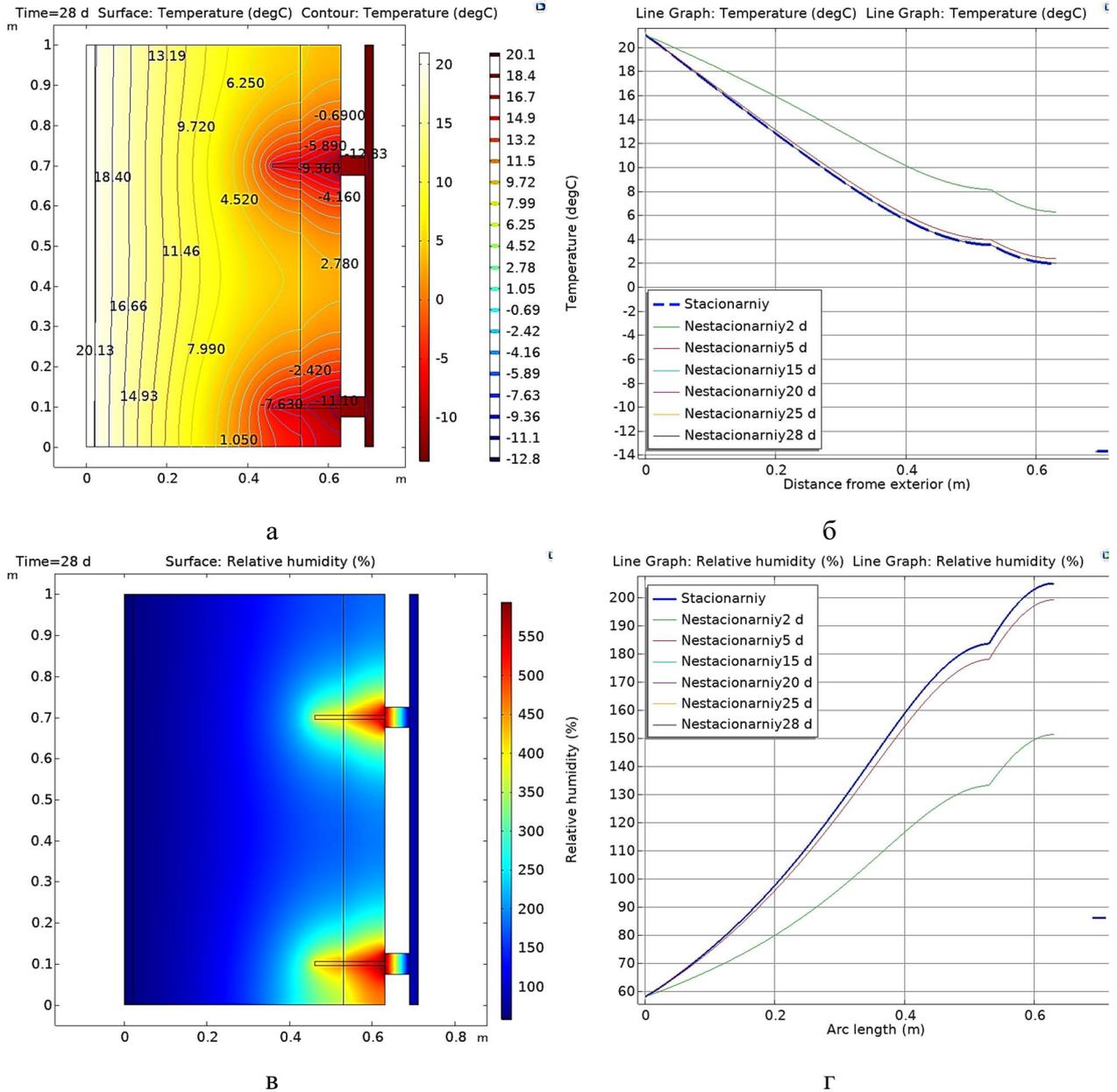
№	Параметры	Внутренняя штукатурка	Кирпичная кладка	Пеноплекс КОМФОРТ	Возд. прос.	Облицовочный слой
1.	Толщина слоя, <i>м</i>	0,02	0.51	0,10	-	0,02
2.	Плотность, <i>кг/м³</i>	1800	1800	30	-	2600
3.	Теплоемкость, <i>кДж/(кг °С)</i>	0,84	0,88	1	-	0,85
4.	Коэффициент теплопроводности, <i>Вт/(м °С)</i> - в сухом состоянии - во влажном состоянии	0,76 0,93	0,7 0,81	0,034 0,0348	- -	3,5
5.	Коэффициент паропроницаемости <i>мг/(м ч Па)</i>	0,09	0,1	0,013	-	0,008
6.	Коэффициент теплообмена поверхности ограждения - с внутренним воздухом, <i>Вт/(м °С)</i> - с наружным воздухом, <i>Вт/(м °С)</i>	8,7 23,0	8,7 23,0	8,7 23,0	- -	8,7 23,0
7.	Коэффициенты аппроксимации A1 A2 A3 B0 B1	0,0121 -0,0178 0,0158 0,0099 0,0062	0,0123 -0,0180 0,0161 0,0238 0,0199	0,0245 -0,0320 0,0260 0,000157 -0,000198	- - - - -	0,01217 -0,0191 0,0169 0,00247 0,0210

На рисунке 4.42 приведены результаты моделирования температурного поля и относительной влажности в ограждающей конструкции с утеплителем ПЕНОПЛЕКС КОМФОРТ на протяжении самого холодного месяца эксплуатации.

Графическое представление температурного поля даёт чёткое понимание, как утеплитель справляется с задачей сохранения тепла, минимизируя теплопотери и предотвращая образование мостиков холода. Параллельно с этим, графики относительной влажности демонстрируют, как ПЕНОПЛЕКС КОМФОРТ регулирует влажностный режим, предотвращая конденсацию и обеспечивая долговечность конструкции.

В местах металлических анкеров (рисунок 4.42, а, б) наблюдается уменьшение температуры от -9,36 °С до -5,89 °С, а значение влажности увеличивается с 284,7 % до 571,7 %. Это связано с материалом данных элементов.

На графиках рисунка 4.42, б в месте воздушной прослойки происходит резкий скачок температуры. Так значение температуры падает с 1,96 °C до –13,7 °C, а значение влажности падает с максимального значения до 86 %.



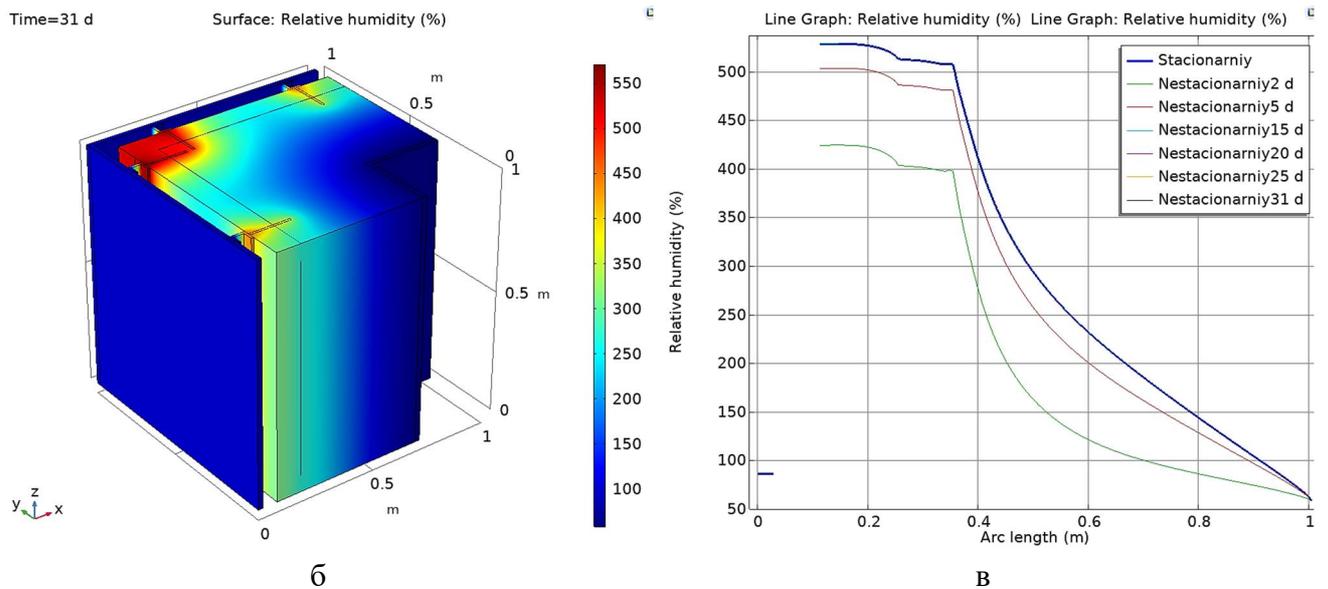
а – изополя температуры; б – графики изменения температуры;

в – изополя относительной влажности;

г – графики изменения относительной влажности

Рисунок 4.42 – Распределение температуры и относительной влажности по толщине стены

На рисунке 4.43 приведены изополя и графики изменения относительной влажности для угла здания. График построен для участка стены от внутреннего угла к внешнему. На графике в слое утеплителя наблюдается максимальное значения влажности, а затем её уменьшение равномерного понижения по толщине стены до 58 %.



а – изополя относительной влажности, б – графики изменения влажности

Рисунок 4.43 – Изменение относительной влажности для угла здания

В качестве примера для дальнейшего сравнения с результатами тепловизионного обследования на рисунке 4.44 представлено расчётное температурное поле в сечении ограждающей конструкции 10.02.2025 г.

На рисунке 4.45 приведена внешняя термограмма тепловизионного обследования теплотехнического состояния фасада здания с четырёхслойной ограждающей конструкцией. Фактическое значение температура на поверхности фасада, утепленного теплоизоляционным материалом, колеблется в пределах – 13,7...– 13,9 °С. По результатам компьютерного моделирования температура на внешней поверхности имеет значения –13,7°С.

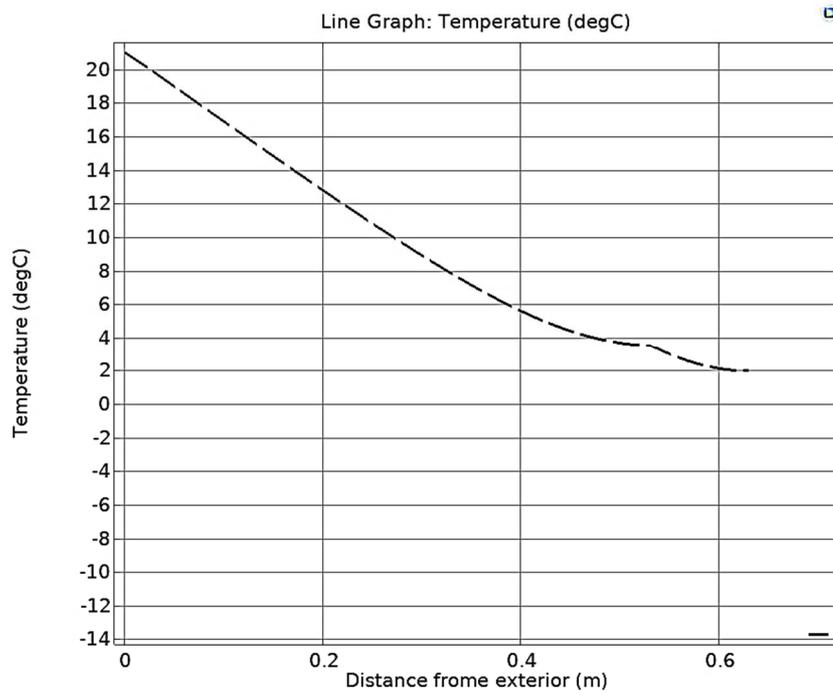
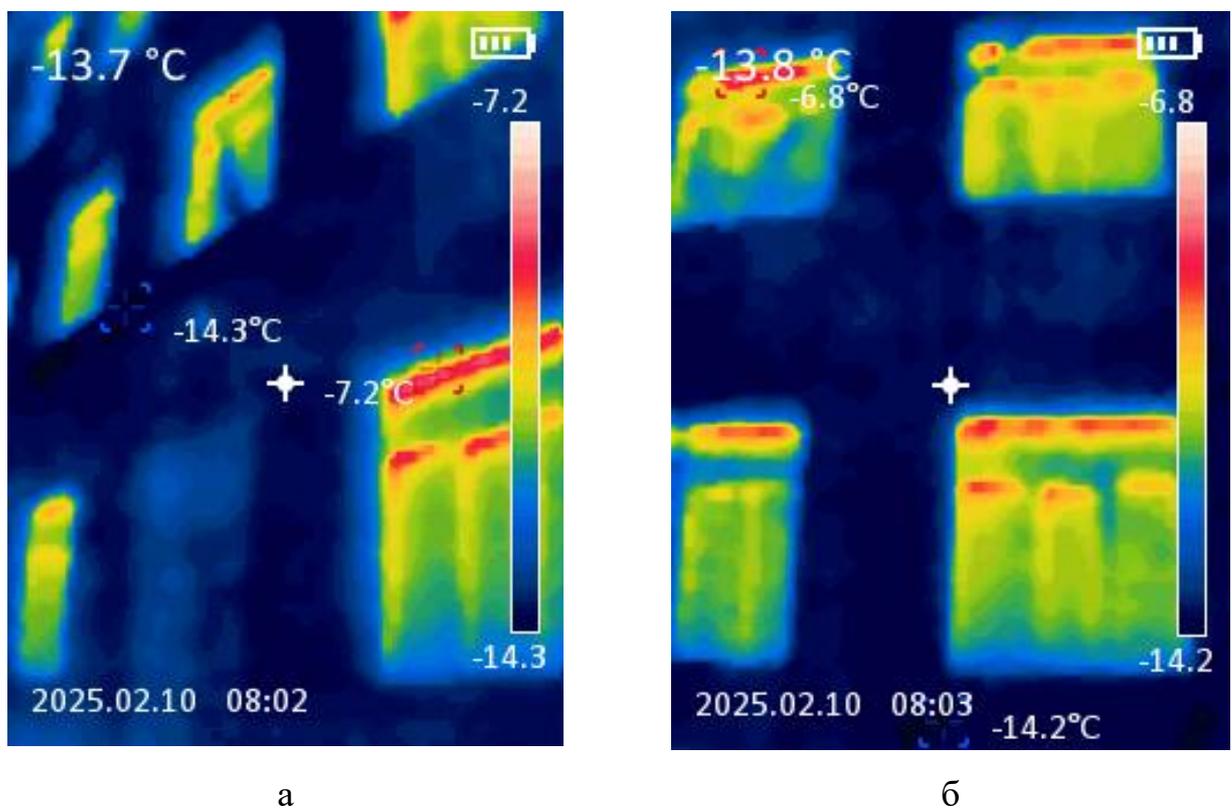


Рисунок 4.44 – Распределение температуры в сечении ограждающей конструкции
10.02.2025 г.



а – стена; б – фрагмент стены около окна

Рисунок 4.45 – Внешняя термограмма фасада зданий

4.3 Сравнительный анализ полученных температур на поверхности наружных ограждающих конструкций по результатам моделирования и с помощью тепловизионной съемки

Результаты сопоставления температурных показателей, зафиксированных на поверхности стены посредством двух различных методик – имитационного моделирования и тепловизионной съемки – детально представлены в таблице 4.10.

Проведенное тепловизионное обследование теплотехнического состояния утепленных ограждающих конструкций существующих зданий массовой застройки с погрешностью до 2,6 % согласуется с результатами расчетов по предложенной методике.

Таблица 4.10 – 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

Выводы по четвертому разделу

На основании проведенных исследований сделаны следующие выводы:

1. Предложена методика моделирования теплотехнических характеристик четырехслойной ограждающей конструкции с учетом изменения влажности в процессе эксплуатации для прогнозирования тепловых потерь систем отопления.

2. На основе представленной методики разработана имитационная модель теплотехнических характеристик четырехслойной ограждающей конструкции в пакете программ COMSOL Multiphysics 6.2 для исследования процессов тепловлагопереноса и прогнозирования тепловых потерь систем отопления.

3. Выполнены исследования теплотехнических характеристик четырехслойной ограждающей конструкции с типовыми теплоизоляционными материалами IZOVOL, ТЕХНОФАС ПРОФ, ПЕНОПЛЕКС КОМФОРТ отечественных производителей на примере жилых зданий массовой застройки г. Луганска.

4. Для каждого варианта четырехслойной ограждающей конструкции проведено тепловизионное обследование эксплуатируемых жилых зданий. Результаты обследований с погрешностью до 2,6 % согласуются с результатами расчетов по предложенной методике.

5. Результаты моделирования теплотехнических характеристик четырехслойной ограждающей конструкции с учетом изменения влажности в процессе эксплуатации для типовых теплоизоляционных материалов опубликованы в работах [149-157].

РАЗДЕЛ 5

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ОТОПЛЕНИЯ ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ МАССОВОЙ ЗАСТРОЙКИ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ Г. ЛУГАНСКА

5.1 Анализ энергоэффективности и экономической целесообразности применения типовых теплоизоляционных материалов для жилых зданий массовой застройки на примере г. Луганска

Оценка энергоэффективности теплоизоляционных материалов проведена по критерию В.Г. Гагарина, П.П. Пастушкова [6]

$$E_{\text{тепл.мат}} = \frac{T_{\text{долг}}}{C_{\text{утеп}} \lambda_{\text{утеп}}}, \quad (5.1)$$

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

Как видно из соотношения (5.1), энергоэффективность утеплителя ограждающей конструкции будет больше, чем выше её долговечность и ниже его стоимость и коэффициент теплопроводности.

В диссертационной работе долговечность всех теплоизоляционных материалов принималась 50 лет, как указано производителем. В таблице 5.1 приведена средняя стоимость за 1 м² на теплоизоляционные материалы ПЕНОПЛЕКС КОМФОРТ, ТЕХНОФАС ПРОФ, IZOVOL для Луганской Народной Республики на начало 2025 г.

Таблица 5.1 – Стоимость утеплителей ПЕНОПЛЕКС, ТЕХНОФАС, IZOVOL

Утеплитель	Стоимость, $C_{утеп.}, руб/м^2$
ПЕНОПЛЕКС КОМФОРТ	1192
ТЕХНОФАС ПРОФ	1517
IZOVOL	772

Результаты оценки энергоэффективности типовых утеплителей по критерию (5.1) в диапазоне значений коэффициента теплопроводности при изменении влажности в условиях эксплуатации г. Луганска приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Результаты оценки энергоэффективности типовых теплоизоляционных материалов

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

Как видно из таблицы, наибольшей энергоэффективностью обладает теплоизоляционный материал ПЕНОПЛЕКС КОМФОРТ.

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,

$$\Delta ПЗ = C_{mn} + E_n \cdot C_{утеп.}, \quad (5.2)$$

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

Для определения годовых эксплуатационных затрат, обусловленными тепловыми потерями, с использованием разработанной имитационной модели выполнена оценка тепловых потоков для каждого месяца отопительного периода через четырехслойную ограждающую конструкцию с типовыми теплоизоляционными материалами. На рисунке 5.1 – 5.6 представлены ежемесячные потери в отопительный период для кирпичной стены с утеплителями IZOVOL, ПЕНОПЛЕКС КОМФОРТ и ТЕХНОФАС ПРОФ.

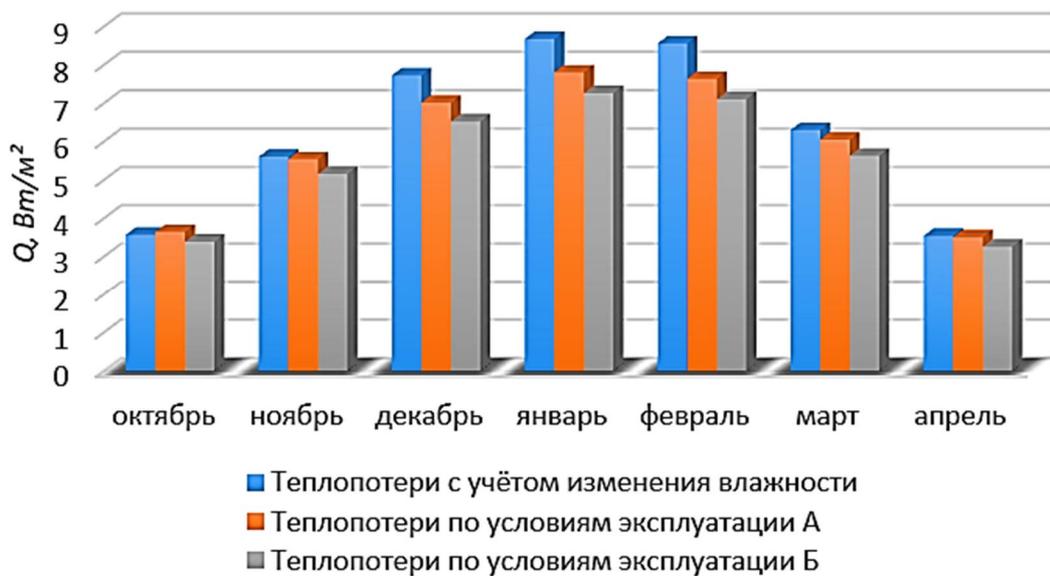


Рисунок 5.1 – Тепловые потери в отопительный период для ограждающей конструкции кирпичного здания с утеплителем IZOVOL

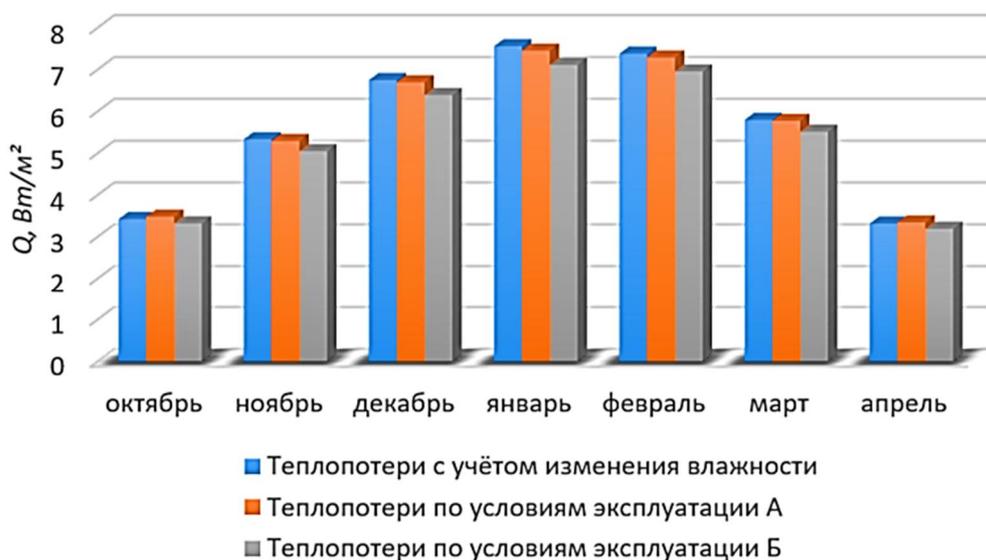


Рисунок 5.2 – Тепловые потери в отопительный период для ограждающей конструкции кирпичного здания с утеплителем ПЕНОПЛЕКС КОМФОРТ

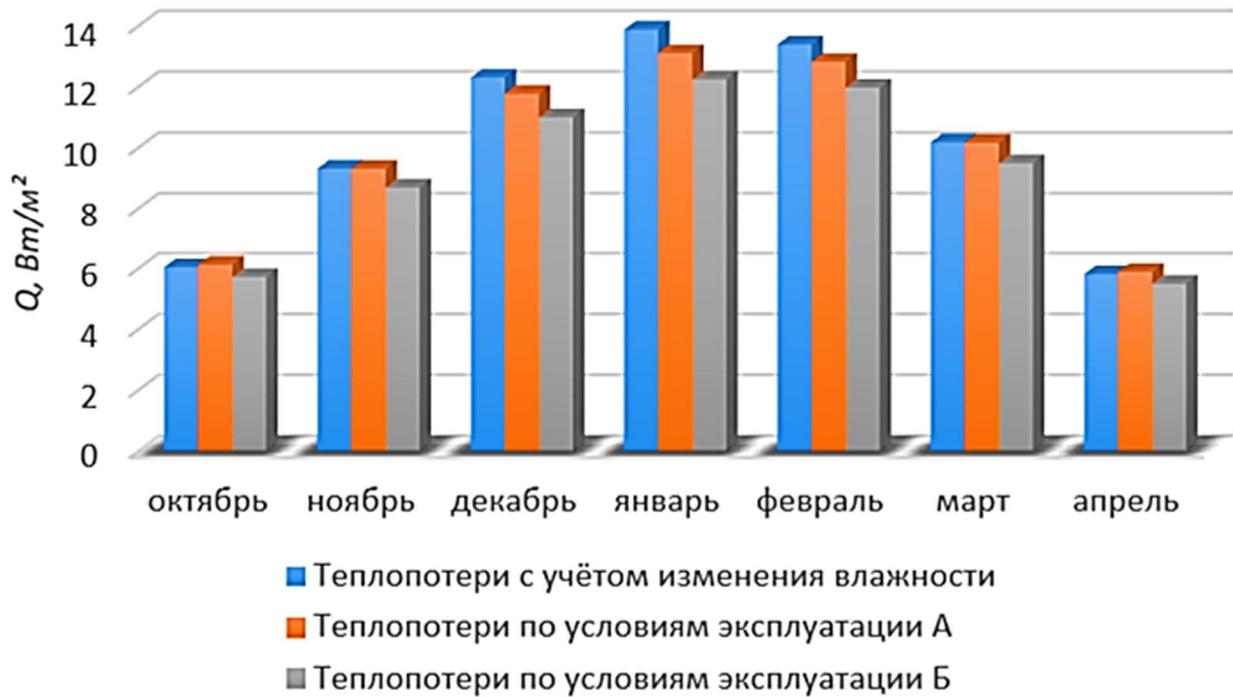


Рисунок 5.3 – Тепловые потери в отопительный период для ограждающей конструкции кирпичного здания с утеплителем ТЕХНОФАС ПРОФ

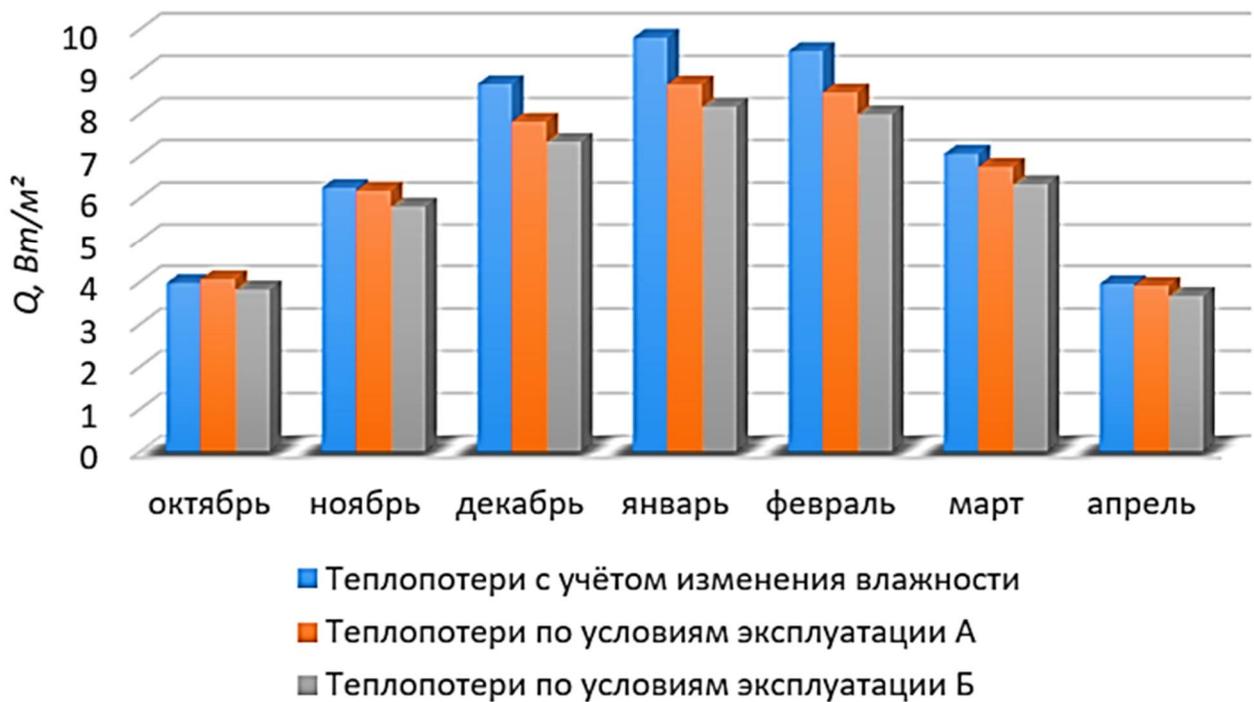


Рисунок 5.4 – Тепловые потери в отопительный период для ограждающей конструкции панельного здания с утеплителем IZOVOL

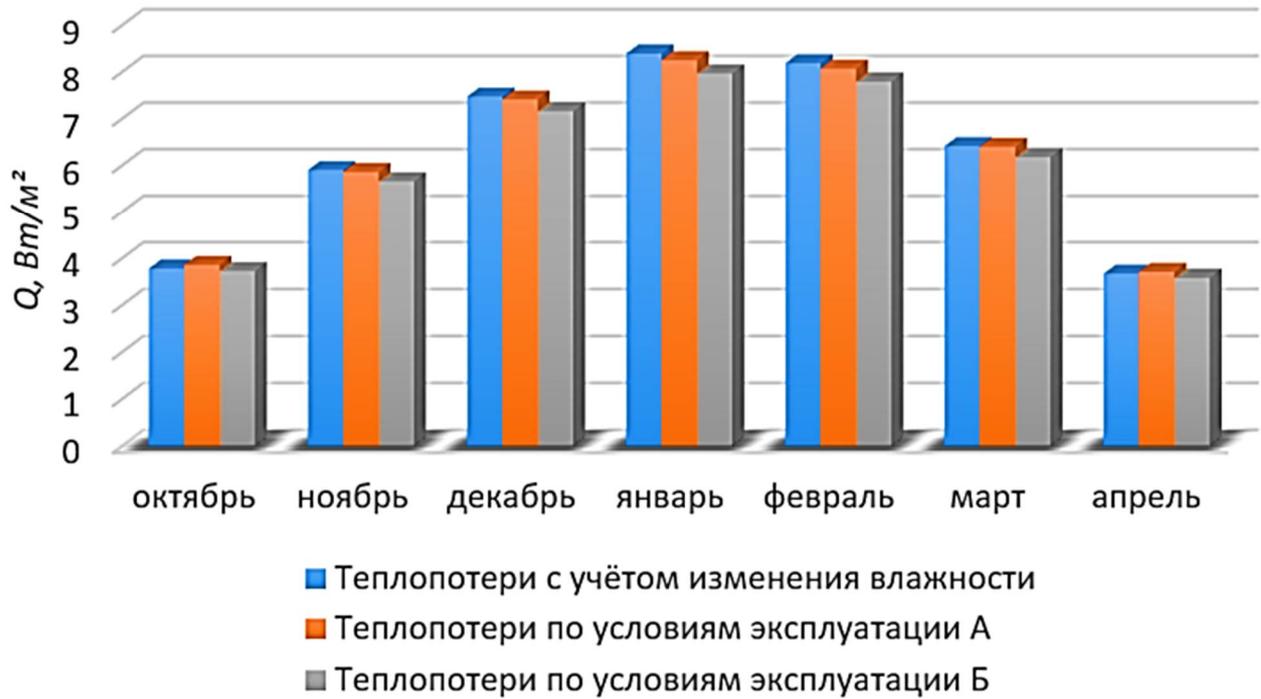


Рисунок 5.5 – Тепловые потери в отопительный период для ограждающей конструкции панельного здания с утеплителем ПЕНОПЛЕКС КОМФОРТ

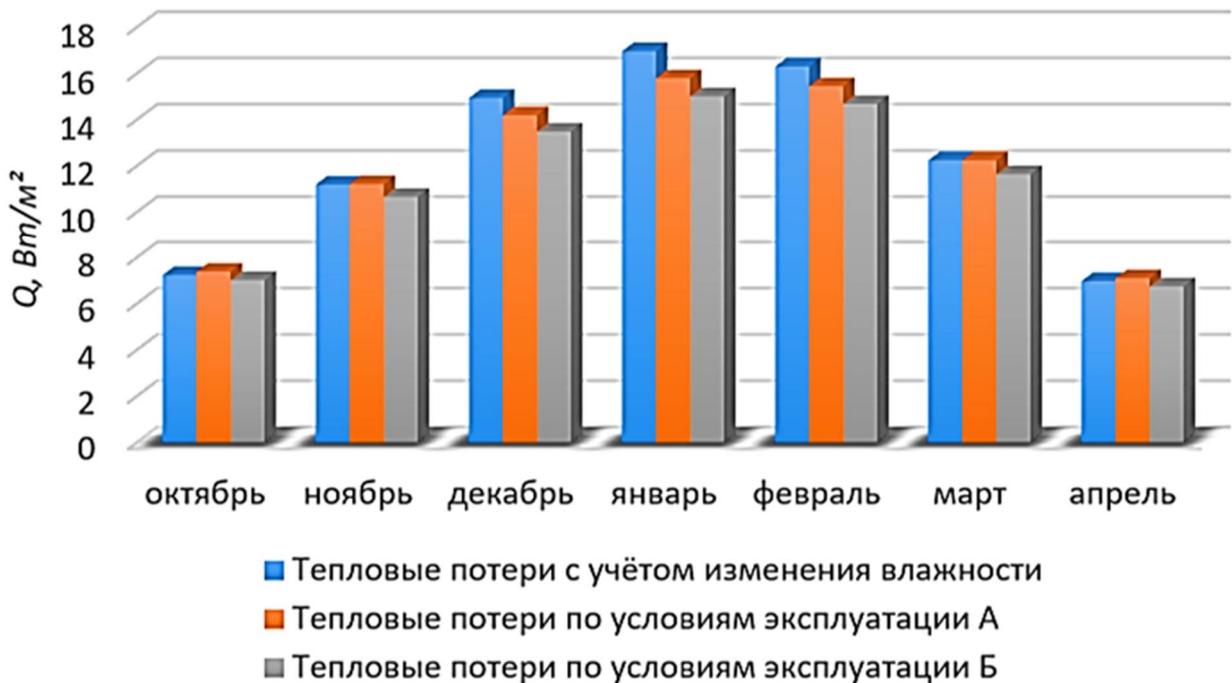


Рисунок 5.6 – Тепловые потери в отопительный период для ограждающей конструкции панельного здания с утеплителем ТЕХНОФАС ПРОФ

Как видно из графиков 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. Наибольшее расхождение значений тепловых потерь достигается в наиболее холодные месяцы. 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 %.

Результаты оценки экономической целесообразности применения типовых теплоизоляционных материалов при стоимости 1 $G_{\text{ккал}}$ 1740,1 руб. [158] представлены в таблице 5.3. Как видно, более высокая экономическая эффективность (меньшие приведенные затраты) в условиях эксплуатации г. Луганска достигается при использовании в четырехслойной ограждающей конструкции утеплителя IZOVOL.

Таблица 5.3 – Результаты оценки экономической целесообразности применения типовых теплоизоляционных материалов

Ценовой параметр	ПЕНОПЛЕКС КОМФОРТ	ТЕХНОФАС ПРОФ	IZOVOL
Стоимость утеплителя $C_{\text{утепл.}}$, руб/м ²	1192	1517	772
Эксплуатационные затраты, обусловленные тепловыми потерями $C_{\text{тп}}$, 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.

5.2. Методика оценки срока окупаемости теплоизоляционных материалов

Для оценки срока окупаемости теплоизоляционного материала общепринятой является методика В.Г. Гагарина и В.В. Козлова [5], согласно которой предварительно оценивается целесообразность применяемого утеплителя для наружных ограждающих конструкций при помощи соотношения

$$\frac{\Delta K}{\Delta k} < 0,024 \cdot ГСОП \cdot C_T / (p_k / 100) = \omega, \quad (5.3)$$

где ΔK – единовременные затраты на дополнительное утепление ограждающих конструкций, руб/м²;

Δk – разница значений коэффициентов теплопередачи до и после утепления наружной ограждающей конструкции, Вт/м²·°С, которая определяется по формуле (5.4);

0,024 – переводной расчётный коэффициент, кВт·ч (Вт·сут);

ГСОП – градусо-сутки отопительного периода, вычисляемые согласно СНиП [39], град·сут/год;

C_T – цена тепловой энергии, руб/кВт·ч;

p_k – процентная ставка по кредиту за год, % в год;

ω – предельное значение для удельных единовременных окупаемых затрат (руб/м²)/(Вт/м²·°С).

Разница значений коэффициентов теплопередачи до и после утепления наружной ограждающей конструкции находится из соотношения

$$\Delta k = \left(\frac{1}{R_{0,1}} - \frac{1}{R_{0,2}} \right), \quad (5.4)$$

где $R_{0,1}$ и $R_{0,2}$ - сопротивление теплопередаче соответственно до и после утепления наружной ограждающей конструкции, $Вт / м^2 \cdot ^\circ C$.

Для г. Луганска приняты следующие параметры формулы (5.3):

- $ГСОП = (t_B - t_{om}) Z_{om} = (21 - 0) \cdot 180 = 3780$ град·сут/год, где Z_{om} – продолжительность отопительного периода, взятое из [39] для г. Луганска;
- величина C_T согласно [158] составляет $1740,1$ руб/Гкал= $1,496$ руб/кВт·ч.

Определяем предельное значение для удельных единовременных окупаемых затрат по формуле (5.3)

$$\omega = 0,024 \cdot 3780 \cdot 1,496 / (10 / 100) = 2193 \text{ (руб/м}^2\text{)/(Вт / м}^2\text{·}^\circ\text{C)}. \quad (5.5)$$

Критерий окупаемости затрат на работы по утеплению наружных ограждающих конструкций зданий в г. Луганске будет равен

$$\Delta K < 2193 \cdot \Delta k. \quad (5.6)$$

Как показали проведенные исследования, теплотехнические характеристики ограждающих конструкций существенно зависят от влажности. Повысить точность расчётов можно, если принимать средние за отопительный период значения коэффициентов теплопроводности.

Для наглядной иллюстрации вышеизложенного, обратимся к конкретному примеру: наружная ограждающая конструкция, схематично представленная на рисунке 4.16. В качестве утеплителя был использован материал IZOVOL.

Расчет сопротивления теплопередаче до проведения работ по утеплению стены базируется на нормативных значениях, установленных для климатической

зоны г. Луганска, регламентированных документом [39]. Определение данного параметра осуществляется по следующей формуле

$$R_0^{норм} = R_0^{мп} \cdot m_p, \quad (5.7)$$

где $R_0^{мп}$ – требуемое сопротивление теплопередаче наружной ограждающей конструкции (согласно [39], $R_0^{мп} = 3,56 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C) / Вт}$;

m_p – коэффициент, учитывающий особенности региона строительства ($m_p = 1$).

Тогда $R_0^{норм} = 3,56 \cdot 0,63 = 2,24 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C) / Вт}$.

Определим теперь значение сопротивления теплопередаче наружной ограждающей конструкции после проведения работ по утеплению. Как следует из результатов, представленных в главе 4, для рассматриваемого варианта утепления кирпичной стены с использованием теплоизоляционного материала IZOVOL, этот показатель составляет $R_{02} = 3,705 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C) / Вт}$. Полученная величина отражает общее термическое сопротивление стены после внедрения теплоизоляции и учитывает как свойства самого утеплителя, так и характеристики существующих слоев конструкции. Сравнение данного значения с исходным сопротивлением теплопередаче (до утепления) позволяет оценить эффективность принятых мер.

После определения всех необходимых значений сопротивлений теплопередаче, произведем расчет разницы коэффициентов теплопередачи до и после проведения работ по теплоизоляции. Для этого используем полученные данные и подставим их в представленное ранее соотношение (5.4)

$$\Delta k = \left(\frac{1}{2,24} - \frac{1}{3,705} \right) = 0,176. \quad (5.8)$$

Затраты на утепление фасадов существующих зданий массовой застройки основаны на данных, предоставленных специализированной компанией,

занимающейся утеплением наружных стен зданий. Эти затраты, рассчитанные на основании рыночных цен и объемов работ, представляют собой значительную инвестицию в повышение энергоэффективности здания и улучшение его эксплуатационных характеристик и составляют 300 руб/м².

Следовательно, критерий окупаемости определяется в виде $300 < 2193 \cdot 0,176$.

Учитывая соблюдение установленного неравенства, можно с уверенностью утверждать о финансовой целесообразности предпринятой модернизации систем отопления. Соблюдение этого критерия является прямым подтверждением того, что первоначальные инвестиции, направленные на повышение теплоизоляционных характеристик ограждающей конструкции, не только покрывают все связанные с ними расходы, но и в перспективе приносят ощутимую экономическую выгоду.

Величина ежегодной прибыли от снижения затрат на отопления 1 м² наружной стены определяется с помощью соотношения [5]

$$\Delta \mathcal{E} = 0,024 \cdot GCOП \cdot \Delta k \cdot C_T. \quad (5.9)$$

Подставим величины для г. Луганска и получим

$$\Delta \mathcal{E} = 0,024 \cdot 3780 \cdot 0,176 \cdot 1,496 = 23,88 \text{ руб}/(\text{м}^2 \cdot \text{год}). \quad (5.10)$$

Определение величины периода единовременных затрат, связанных с дополнительным утеплением, рассчитывается по следующей формуле

$$T_o = \ln \left[1 / \left(1 - \frac{\Delta K}{\Delta \mathcal{E}} \cdot (p_k / 100) \right) \right] / \ln(1 + p_k / 100). \quad (5.11)$$

Подставим найденные величины для г. Луганска в соотношение

$$T_o = \ln \left[1 / \left(1 - \frac{386}{38,59} \cdot (0,1 / 100) \right) \right] / \ln(1 + 0,1 / 100) = 10,05 \text{ лет}. \quad (5.12)$$

Таким образом, можно сделать вывод, что инвестиции в теплоизоляцию наружной ограждающей конструкции посредством применения материалов IZOVOL окупятся в течение 10,05 лет. Учитывая заявленный производителем срок службы утеплителя IZOVOL, существенно превышающий этот период, можно с уверенностью утверждать о целесообразности данного мероприятия. Это означает, что улучшение теплотехнических характеристик здания посредством утепления не только обеспечит комфортный микроклимат внутри помещений и снизит эксплуатационные расходы, но и окажется экономически выгодным в долгосрочной перспективе.

В то же время, необходимо отметить, что при расчете срока окупаемости учитывались все существенные факторы, включая текущие цены на энергоносители и затраты на приобретение и монтаж утеплителя. Однако, если из формулы, используемой для расчета периода окупаемости (формула 5.11), исключить процентную ставку по кредиту, полученному на проведение работ по утеплению, то период окупаемости существенно сократится. В этом случае, инвестиции в утепление наружной ограждающей конструкции окупятся в течение 6-7 лет.

Выводы по пятому разделу

На основании проведенных исследований сделаны следующие выводы:

1. Выполнен анализ экономической энергоэффективности применения типовых теплоизоляционных материалов ПЕНОПЛЕКС КОМФОРТ, ТЕХНОФАС ПРОФ, IZOVOL для жилых зданий массовой застройки в условиях эксплуатации г. Луганска. Оценка проведена по критерию Гагарина.

2. 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. Наибольшее расхождение значений тепловых потерь достигается в наиболее

холодные месяцы. 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 %.

3. Выполнен анализ экономической целесообразности применения типовых теплоизоляционных материалов ПЕНОПЛЕКС КОМФОРТ, ТЕХНОФАС ПРОФ, IZOVOL отечественных производителей для ограждающих конструкций для жилых зданий массовой застройки в условиях эксплуатации г. Луганска.

3. 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.

4. Уточнена методика оценки срока окупаемости теплоизоляционных материалов с учётом изменения влажности в процессе эксплуатации.

5. Результаты исследований по повышению эффективности систем отопления опубликованы в работе [152-154].

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 ПЕНОПЛЕКС КОМФОРТ 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 (Приложения). Ожидаемый годовой экономический эффект от модернизации системы отопления цеха металлоконструкций ЧАО «Луганский завод «Сантехдеталь» составляет 157,8 тыс. руб.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральный закон «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» (№ 261 от 21.12.2009 г.). – Москва: Кремль, 2009. – 43 с.

2. Постановление Правительства РФ «Об утверждении Правил установления требований энергетической эффективности для зданий, строений, сооружений и требований к правилам определения класса энергетической эффективности многоквартирных домов» (№ 1628 от 27.09.2021 г.) – Москва: Кремль, 2021. – 4 с.

3. Приказ Министерства регионального развития РФ «Об утверждении требований энергетической эффективности зданий, строений, сооружений» (№ 1550/пр от 17.11.2017 г.). – Москва: Кремль, 2017. – 5 с.

4. Альтшуллер, Е.Н. Эффективность применения слоистых стен в монолитном домостроении / Е.Н. Альтшуллер // Бетон и железобетон. – 1993. – № 2. – С. 27-28.

5. Гагарин, В.Г. Теория состояния и переноса влаги в строительных материалах и теплозащитные свойства ограждающих конструкций зданий: дис. ... д-ра. техн. наук: 05.23.01 / Гагарин Владимир Геннадьевич. – Москва, 2000. – 396 с.

6. Гагарин, В.Г., Пастушков П.П. Количественная оценка энергоэффективности энергосберегающих мероприятий / В.Г. Гагарин, П.П. Пастушков // Строительные материалы. – 2013. – № 6 – С.7-9.

7. Перехоженцев, А.Г. Исследование процессов влагопереноса в пористых строительных материалах при решении задач прогноза влажностного состояния неоднородных ограждающих конструкций зданий: дис. ... д-ра. техн. наук: 05.23.01, 05.23.03 / Перехоженцев Анатолий Георгиевич. – Москва, 1998. – 323 с.

8. Перехоженцев, А.Г. Исследование тепловлажностного состояния ограждающих конструкций зданий в области теплопроводных включений: дис. ...

канд. техн. наук: 05.23.03 / Перехоженцев Анатолий Георгиевич. – Волгоград, 1978 – 141 с.

9. Корниенко, С.В. Оценка гигротермических характеристик конструкции многослойных стен в годовом цикле / С.В. Корниенко, Н.И. Ватин, М.Р. Петриченко, А.С. Горшков // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2015. – № 6 – С. 19-33.

10. Корниенко, С.В. Оценка влажностного режима стен с использованием фасадного теплоизоляционного композита / С.В. Корниенко, Н.И. Ватин, А.С. Горшков // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2016. – № 6(45) – С. 34-54.

11. Куприянов, В.Н. Влияние влаги на теплопроводность стеновых материалов. Состояние вопроса / В.Н. Куприянов, А.М. Юзмухаметов, И.Ш. Сафин // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2017. – Т. 39. – № 1. – С. 102-110.

12. Самарин, О.Д. О скорости понижения температуры в наружном углу здания при аварийных режимах теплоснабжения / О.Д. Самарин // Изв. вузов. Строительство. – 2008. – № 2. – С.62-67.

13. Корниенко, С.В. Совершенствование российских норм по влагозащите элементов ограждающих конструкций зданий / С.В. Корниенко // Вестник ВГТУ. – 2017. – № 47(66) – С. 18-29.

14. Корниенко, С.В. Предложения по исправлению СП 50.13330.2012, касающиеся защиты ограждающих конструкций от переувлажнения / С.В. Корниенко // Жилищное строительство. – 2015. – № 7. – С. 31-34.

15. Шойхет, Б.М. Некоторые аспекты энергоэффективности навесных вентилируемых фасадов / Б.М. Шойхет // Энергосбережение. – 2011. – № 7. – С. 60-64.

16. Корнилов, Т.А. Опыт эксплуатации вентилируемых фасадов зданий в условиях сурового климата / Т.А. Корнилов // Изв. вузов. Строительство. – 2008. – № 1. – С. 99-104.

17. Езерский, В.А. Оптимизация термомодернизации крупнопанельного жилого здания с учётом срока службы теплозащитных мероприятий / В.А. Езерский, П.В. Монастырёв, Р.Ю. Клычников // Строительные материалы. – 2013. – № 7. – С. 25-27.

18. Хуторной, А.Н. Теплозащитные свойства неоднородных керамзитобетонных наружных стен зданий / А.Н. Хуторной, А.В. Колесников // Изв. вузов. Строительство. – 2004. – № 7. – С. 18-20.

19. Перехоженцев, А.Г. Теоретические основы и методы расчета температурно-влажностного режима ограждающих конструкций зданий / А.Г. Перехоженцев. – Волгоград: ВолгГАСУ, 2008. – 212 с.

20. Бородин, А.И. Учёт влияния влажности среды при расчёте термического сопротивления ограждающей конструкции / А.И. Бородин, З.Б. Чапанов // Изв. вузов. Строительство. – 2009. – № 7. – С. 40-43.

21. Revue techniques du batiment et des construction industrielle. – 1988. – № 127. – Р. 51-58.

22. Ерёмкин, А.И. Методика исследования надёжности и энергетической эффективности систем теплоснабжения / А.И. Ерёмкин, Е.Г. Ежов, В.А. Леонтьев // Региональная архитектура и строительство. – Пенза: Пензенский государственный университет архитектуры и строительства. – 2021. – № 2 (47). – С. 109-117.

23. Долгов, Н.В. Комбинированные системы теплоснабжения на базе солнечных коллекторов / Н.В. Долгов, А.А. Полковников, С.А. Губарь // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2024. – № 5 (169) – С. 80-88.

24. Рубашкина, Т.И. Исследование эффективности современных утеплителей в многослойных ограждающих конструкциях зданий: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.03 / Татьяна Ивановна Рубашкина. – Чита, 2009. – 23 с.

25. 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.

26. Экспресс-информация. Зарубежный опыт / ВНИИС – 1985. – серия 8. – выпуск 12. – С.13-15.

27. Hebgen H. Energieinsparung und baulicher Wärmeschutz / H. Hebgen // Deutsche Bauzeitschrift. – 1979. – № 12. – S. 1901-1905.

28. Фокин, К.Ф. Уточненный метод расчета влажностного режима ограждающих конструкций / К.Ф. Фокин // Холодильная техника. – 1955. – № 3. – С. 28-32.

29. Франчук, А.У. Теоретические основы и метод расчета увлажнения ограждающих частей зданий: в кн.: исследования по строительной физике / А.У. Франчук. – Москва - Л.: ЦНИИПС, 1951. – № 4. – С. 17-59.

30. Luikov, A.V. Heat and Mass Transfer in Capillary Porous Bodies / A.V. Luikov. – Pergamon, Oxford, 1966. – 531 с.

31. Богословский, В.Н. Исследования температурно-влажностного режима наружных ограждений зданий методом гидравлических аналогий: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.03 / Богословский Вячеслав Николаевич. – Москва, 1954. – 16 с.

32. Береговой, А.М. Температурно-влажностное состояние наружных ограждений в условиях фазовых переходов влаги и агрессивных воздействий среды / А.М. Береговой, В.А. Береговой // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – Т. 32. – № 3. – С. 99-104.

33. Денисов, Д.Ю. К вопросу использования жидкостекольных композиций в производстве теплоизоляционных материалов / Д.Ю. Денисов, В.З. Абдрахимов // Изв. вузов. Строительство. – 2011. – № 11. – С. 32-37.

34. Использование жидкостекольной композиции в производстве зернистого теплоизоляционного материала / И.В. Ковков, Д.Ю. Денисов, В.З. Абдрахимов, В.А. Куликов // Изв. вузов. Строительство. – 2011. – № 7. – С. 21-25.

35. Пучка, О.В. Новый композиционный теплоизоляционный материал на основе пеностекла с покрытием на лицевой поверхности / О.В. Пучка,

А.А. Кузьменко, М.Н. Степанова // Изв. вузов. Строительство. – 2007. – №11. – С. 53-55.

36. Бернацкий А.Ф. Получение теплоизоляционных материалов на основе древесных отходов / А.Ф. Бернацкий, О.Н. Федина // Изв. вузов. Строительство. – 2006. – № 11-12. – С.23-26.

37. Гнездилова, О.А. Исследование физико-технических свойств «Поропласта CF02», используемого в качестве теплоизолятора слоистой каменной кладки / О.А. Гнездилова, В.А. Москвитин, Б.И. Пинус // Экспертиза и управление недвижимостью: состояние, проблемы, перспективы. Мат-лы ВНКП. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2007. – С.30-38.

38. 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.

39. СП 50.13330.2024 «Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003» – Москва: Минстрой России, 2024. – 100 с.

40. Карслоу, Г. Теплопроводность твердых тел / Г. Карслоу, Д. Егер. – Москва: Наука, 1964. – 487 с.

41. Лыков, А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков. – Москва: Высшая школа, 1967. – 600 с.

42. Алифанов, О.М. Идентификация процессов теплообмена летательных аппаратов / О.М. Алифанов. – Москва: Машиностроение, 1979. – 216 с.

43. Карташов, Э.М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел / Э.М. Карташов. – Москва: Высшая школа, 1985. – 480 с.

44. Никитенко, Н.И. Теория тепло- и массопереноса / Н.И. Никитенко. – Киев: Наукова думка, 1983. – 349 с.

45. Зарубин, В.С. Инженерные методы решения задач теплопроводности / В.С. Зарубин. – Москва: Энергоатомиздат, 1983. – 328 с.

46. Коздоба, Л.А. Методы решения нелинейных задач теплопроводности / Л.А. Коздоба. – Москва: Наука, 1975. – 228 с.

47. Рвачев, В.Л. Алгебрологические и проекционные методы в задачах теплообмена / В.Л. Рвачев, А.П. Слесаренко. – Киев: Наукова думка, 1978. – 139с.
48. Камья, Ф.М. Импульсная теория теплопроводности / Ф.М. Камья. – Москва: Энергия, 1972. – 272 с.
49. Постольник, Ю.С. Приближенные методы исследований в термомеханике / Ю.С. Постольник. – Киев: Вища школа, 1984. – 158 с.
50. Беляев, Н.М. Методы нестационарной теплопроводности / Н.М. Беляев, А.А. Рядно. – Москва: Высшая школа, 1978. – 328 с.
51. Мачинский, В.Д. К вопросу о конденсации водяных паров в строительных ограждениях / В.Д. Мачинский // Вестник инженеров и техников. – 1935. – № 12. – С. 742-745.
52. Фокин, К.Ф. Расчет влажностного режима наружных ограждений. / К.Ф. Фокин. – Москва - Л.: ОНТИ, 1935. – 22 с.
53. Лыков, А. В. Явление переноса в капиллярно-пористых средах / А.В. Лыков. – Москва, 1954 – 296 с.
54. Богословский, В.Н. Основы теории потенциала влажности материала применительно к наружным ограждениям оболочки зданий: монография / В.Н. Богословский; под ред. В.Г. Гагарина. – Москва: МГСУ, 2013. – 112 с.
55. Ильинский, В.М. Расчет влажностного состояния ограждающих конструкций при диффузии водяного пара / В.М. Ильинский // Промышленное строительство. – 1965. – № 2. – С. 223-228.
56. Франчук, А.У. Таблицы теплотехнических показателей строительных материалов / А.У. Франчук. – Москва, 1969. – 136 с.
57. Видин, Ю.В. Инженерные методы расчета процессов теплопереноса / Ю.В. Видин. – Красноярск: Изд-во Красноярского политехнического института, 1974. – 144 с.
58. Иванов, В.В. Тепловые режимы неоднородных ограждающих конструкций / В.В. Иванов, А.Н. Бутенко, Л.В. Карасёва // Изв. вузов. Строительство. – 2007. – № 4. – С. 24-27.

59. Маоми, Г.К. Динамика переноса тепла в многослойных телах при нагреве радиацией и конвекцией одновременно: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 01.04.14. / Гван Клотер Маоми. – Киев, 1987. – 17 с.

60. Мусорина, Т.А. Математический аппарат для определения термического сопротивления однородной скалярной среды / Т.А. Мусорина, Д.Д. Заборова, М.Р. Петриченко // Вестник МГСУ. – 2019. – Т. 14. – Вып. 8. – С. 1037-1045.

61. Gamayunova, O. Humidity distributions in multilayered walls of high-rise buildings / O. Gamayunova, T. Musorina, A.D. Ishkov // E3S Web of Conferences. – 2018. – № 33. – P. 1-6.

62. Coupled heat and moisture transfer in building material with freezing and thawing process / X.W. Shen, L.J. Li, W.Z. Cui, Y. Feng // Journal of building engineering. – 2018. – Vol. 20. – P. 609-615.

63. Simulation of heat and moisture flow through walls covered with uncoated medium density expanded cork / A. Tadeu, L. Skerget, N. Simoes, R. Fino // Building and environment. – 2018. – Vol. 142 – P. 195-210.

64. A model for the effective thermal conductivity of moist porous building materials based on fractal theory / Y.Y. Wang, C. Ma, Y.F. Liu, D.J. Wang, J.P. Liu // International journal of heat and mass transfer. – 2018. – Vol. 125. – P. 387-399.

65. Аксаковская, Л.Н. Взаимосвязанный тепломассоперенос в многослойных ограждающих конструкциях зданий и сооружений при эксплуатации и технологии их производства: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08 / Аксаковская Любовь Николаевна. – Иваново, 2003. – 160 с.

66. Гагарин, В.Г. Математическая модель и инженерный метод расчета влажностного состояния ограждающих конструкций / В.Г. Гагарин, В.В. Козлов // Academia. Архитектура и строительство. – 2006. – № 2. – С. 60-63.

67. Гороховский, А.Г. Повышение точности решения задачи тепломассообмена при анализе процесса сушки капиллярно-пористого тела / А.Г. Гороховский, Е.Е. Шишкина, О.Н. Чернышев // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2-1. – С. 218.

68. Тепло- и массоперенос в многослойном деревянном клееном брус: постановка задачи / К.В. Зайцева, А.А. Титунин, Л.Ю. Гнедина, А.М. Ибрагимов // Промышленное и гражданское строительство. – 2015. – № 8. – С. 21-27.

69. Ибрагимов, А.М. Нестационарный тепло- и массоперенос в многослойных ограждающих конструкциях: дис. ... д-ра. техн. наук: 05.23.01 / Ибрагимов Александр Майорович. – Москва, 2006. – 349 с.

70. Руководство по расчету влажностного режима ограждающих конструкций зданий. – Москва: Стройиздат, 1984. – 168 с.

71. Нестационарный массоперенос в процессах коррозии второго вида цементных бетонов. Малые значения чисел Фурье, с внутренним источником массы / С.В. Федосов, В.Е. Румянцева, Н.С. Касьяненко, И.В. Красильников // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. – 2015. – Т. 58. – № 1. – С. 97-99.

72. Mendes, N. A method for predicting heat and moisture transfer through multilayered walls based on temperature and moisture content gradients / N. Mendes, P.C. Philippi // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2005. – Vol. 48. – № 1. – P. 37-51.

73. Лукьянов, В.И. Нестационарный массоперенос в строительных материалах и конструкциях при решении проблемы повышения защитных качеств ограждающих конструкций зданий с влажным и мокрым режимом: дис. ... д-ра. техн. наук: 05.23.01 / Лукьянов Вениамин Иванович. – Москва, 1993. – 653 с.

74. Физико-математическая модель тепловлагодпереноса в ограждающих конструкциях из профилированного теплового бруса / Н.А. Цветков, А.Н. Хуторной, А.В. Толстых, А.В. Колесникова // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2017. – Т. 698. – № 2. – С. 12-20.

75. Козлов, В.В. Метод инженерной оценки влажностного состояния современных ограждающих конструкций с повышенным уровнем теплозащиты при учете паропроницаемости, влажопроводности и фильтрации воздуха // дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01, 05.23.03 / Козлов Владимир Владимирович. – Москва, 2004. – 161 с.

76. Тертичник, Е.И. Исследование влажностного состояния наружных ограждений зданий на основе потенциала влажности: дис. ... канд. техн. наук: 05.00.00 / Тертичник Евгений Иванович. – Москва, 1966. – 136 с.

77. Arfvidsson, J. Moisture transport in porous media. Modelling based on Kirchhoff potentials // Doctoral dissertation / Arfvidsson Jesper. – Lund, 1998. – 130 p.

78. Künzeli, H.M. Simultaneous heat and moisture transport in building components. One- and two-dimensional calculation using simple parameters: PhD Thesis / Künzeli Hartwig M. – Stuttgart, 1995. – 65 p.

79. Бессонов, И.В. Моделирование нестационарного тепло-влажноперевода в вентилируемой воздушной прослойке наружного ограждения здания / И.В. Бессонов, А.И. Фомичев // Вестник МГСУ. – 2011. – № 3-1. – С. 228-234.

80. Васильев, Г.П. Моделирование процесса сушки ограждающих конструкций зданий / Г.П. Васильев, В.А. Личман, Н.В. Песков // Жилищное строительство. – 2013. – № 7. – С. 21-26.

81. Грабарь, Ю. Г. Процессы тепловлажноперевода в стеновых панелях при переменных параметрах окружающей среды в условиях производства и эксплуатации: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.13 / Грабарь Юрий Геннадьевич. – Иваново, 2006. – 122 с.

82. Влияние температурной зависимости изотермы сорбции и коэффициента влажностопроводности на влажностоперенос в стене из газобетона / А.В. Жуков, Н.А. Цветков, А.Н. Хуторной, А.В. Толстых // Вестник МГСУ. – 2018. – Т. 13. – № 6(117). – С. 729-739.

83. Корниенко, С.В. Исследование совместного нестационарного тепло-влажноперевода в ограждающих конструкциях зданий (трехмерная задача): дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01, 05.23.03 / Корниенко Сергей Валерьевич. – Москва, 2000. – 172 с.

84. Корниенко, С.В. Повышение энергоэффективности зданий за счет совершенствования методов расчета температурно-влажностного режима ограждающих конструкций: дис. ... докт. техн. наук: 05.23.03 / Корниенко Сергей Валерьевич. – Волгоград, 2018. – 380 с.

85. Мирошниченко, Т.А. Нестационарный тепло- и влагоперенос в многослойных наружных ограждениях с включениями: дис. ... канд. физ-мат. наук: 01.04.14 / Мирошниченко Татьяна Анатольевна. – Томск, 2006. – 227 с.
86. Galbraith, G.H. The effect of temperature on the moisture permeability of building materials / G.H. Galbraith, J.S. Guo, R.C. McLean // Building Research & Information. – 2000. – Vol. 28. – № 4. – P. 245-259.
87. Pel, L. Moisture transport in porous building materials: PhD Thesis / Pel Leo. – Eindhoven, 1995. – 140 p.
88. Изменение теплофизических характеристик наружных ограждающих конструкций в условиях реального температурно-влажностного режима / С.С. Добросмыслов, М.М. Пылаева, Н.В. Огорельцева, М.А. Перькова // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2018. – Т. 45. – № 3. – С. 114-120.
89. Иванова, Ю.В. Разработка внутренних утеплительных панелей для наружных стен реконструируемых зданий: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.03 / Иванова Юлия Витальевна. – Санкт-Петербург, 2002. – 171 с.
90. Пастушков, П.П. Влияние влажностного режима ограждающих конструкций с наружными штукатурными слоями на энергоэффективность теплоизоляционных материалов: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.03 / Пастушков Павел Павлович. – Москва, 2013. – 169 с.
91. Ушков, Ф.В. Метод расчета увлажнения ограждающих частей зданий / Ф.В. Ушков. – Москва: Изд-во МКХ РСФСР, 1955. – 105 с.
92. Galbraith, G.H. Moisture permeability measurements under varying barometric pressure - Experimental methodology is developed for measuring moisture permeability of vapour and liquid / G.H. Galbraith, R.C. McLean, D. Kelly // Building research and information. – 1997. – Vol. 25. – № 6. – P. 348-353.
93. Богословский, В.Н. Тепловой режим здания / В.Н. Богословский. – Москва: Стройиздат, 1979. – 248 с.

94. Брилинг, Р.Е. Исследование морозостойкости строительных материалов в наружных ограждениях / Р.Е. Брилинг // Исследования по строительной физике. Сборник трудов ЦНИИПС. – 1951. – С. 60-84.
95. Давыденко, Н.В. Влияние показателя влажности на коэффициент теплопроводности соломенных и костросломенных теплоизоляционных материалов / Н.В. Давыденко, А.А. Бакатович // Вестник Полоцкого государственного университета. – 2013. – № 8. – С. 73-78.
96. Drochytka, R. Non-destructive Testing of Influence of Moisture on Properties of Autoclaved Aerated Concrete / R. Drochytka, J. Zach, J. Hroudova // E-Journal of Nondestructive Testing. – 2011. URL:http://www.ndt.net/article/ndtnet/2011/36_Zach.pdf.
97. Suchorab, Z. Influence of moisture on heat conductivity coefficient of aerated concrete / Z. Suchorab, D. Barnat-Hunek, H. Sobczuk // Ecological Chemistry and Engineering. – 2011. – V. 18. – № 1. – P. 111-120.
98. Киселев, И.Я. Метод расчета равновесной сорбционной влажности строительных материалов / И.Я. Киселев // Вестник МГСУ. – 2011. – № 3. – С. 92-98.
99. Крутилин, А.Б. Теплофизические характеристики автоклавных ячеистых бетонов низких плотностей и их влияние на долговечность наружных стен зданий / А.Б. Крутилин, Ю.А. Рыхленок, В.В. Лешкевич // Инженерно-строительный журнал. – 2015. – № 2. – С. 46-55.
100. Гагарин, В.Г. К вопросу о назначении расчетной влажности строительных материалов по изотерме сорбции / В.Г. Гагарин, П.П. Пастушков, Н.А. Реутова // Строительство и реконструкция. – 2015. – № 4 (60). – С. 152-155.
101. Петров, А.С. Паропроницаемость и влажность многослойных конструкций наружных стен при эксплуатационных воздействиях: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / Петров Артем Сергеевич. – Казань, 2016. – 150 с.
102. Стерлягов, А.Н. Совместный тепло- и влагоперенос в ограждающих конструкциях зданий из газобетона: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.03 / Стерлягов Алексей Николаевич. – Новосибирск, 2007. – 167 с.

103. Иванцов, А.И. Режим эксплуатации многослойных стеновых ограждающих конструкций, как основа прогнозирования их срока службы / А.И. Иванцов, В.Н. Куприянов // Известия КГАСУ. – 2014. – № 3 (29). – С. 32-40.
104. ISO 8301:1991 Thermal insulation — Determination of steady-state thermal resistance and related properties — Heat flow meter apparatus. – 1991. – 38 p.
105. ISO 8302:1992 Thermal insulation — Determination of steady-state thermal resistance and related properties — Guarded hot plate apparatus. – 1991. – 47 p.
106. ISO 8990:1994 Thermal insulation — Determination of steady-state thermal transmission properties — Calibrated and guarded hot box. – 1994. – 19 p.
107. ISO 10456:2007 (E) Building materials and products. Hygrothermal properties. Tabulated design values and procedures for determining declared and design thermal values. – 2007. – 27 p.
108. 13788:2012 (E) Hygrothermal performance of building components and building elements — Internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation — Calculation methods. – 2012. – 48 p.
109. Борщевский, А.Н. Причины поражения зданий домовыми грибами / А.Н. Борщевский. – Москва - Ленинград: Госстройиздат, 1932. – 124 с.
110. Шкловер, А.М. О расчете увлажнения наружных ограждений зданий методом стационарного режима / А.М. Шкловер // Строительная промышленность. – 1949. – № 7. – С. 20-23.
111. Поликанов, М.В. Теплотехнический расчет ограждений влажных и мокрых помещений / М.В. Поликанов // Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1960. – № 1. – С. 79-90.
112. Вытчиков, Ю.С. Определение плоскости конденсации для многослойных ограждающих конструкций / Ю.С. Вытчиков // Строительные материалы. – 2006. – № 4. – С. 92-94.
113. Иванов, В.В. Тепловые режимы неоднородных ограждающих конструкций / В.В. Иванов, А.Н. Бутенко, Л.В. Карасёва // Изв. вузов. Строительство. – 2007. – №4. – С.24-27.

114. Андреев, Д.А. Выбор расположения слоев ограждающей конструкции с учетом предотвращения внутренней конденсации / Д.А. Андреев, В.А. Могутов, А.Н. Цирлин // Строительные материалы. – 2001. – № 12. – С. 42-45.
115. Glaser, H. Graphisches Verfahren zur Untersuchung von Diffusionsvorgängen / H. Glaser // Kältetechnik Bd. II. – 1959. – P. 345-349.
116. Эпштейн, А.С. Расчет конденсационного увлажнения конструкций / А.С. Эпштейн // Проект и стандарт. – 1936. – № 11. – С. 10-14.
117. Власов, О.Е. Приложение теории потенциала к исследованию теплопроводности / О.Е. Власов // Известия Теплотехнического института. – 1928. – № 5 (38).
118. Глобус, А.М. Физика неизотермического внутрпочвенного влагообмена / А.М. Глобус. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1983. – 279 с.
119. Kohonen R. Transient analysis of the thermal and moisture physical behaviour of the building constructions / R. Kohonen, J. Maatta. – Research Reports: Espoo, 1983. – 78 p.
120. Gawin D. Model sprzezonego transportu masy i energii w osrodkach kapilarno-porowatych / D. Gawin, P. Klemm // Materialy konferencyjne. – Lodz, 1989. – P. 30-35.
121. Rode C., Burch D.M. Empirical validation of a transient computer model for combined heat and moisture transfer / C. Rode, D.M. Burch // Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Building VI, December 4–8. – Clearwater Beach, FL, 1995. – P. 283-295.
122. Yasin, Yu.D. Termodinamicheskaya interpretatsiya matematicheskoy modeli rav-novesnogo sostoyaniya faz vlagi v kapillyarnoporistykh materialakh. / Yu.D. Yasin // Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal. – 1984. – 47(3). – P. 221-228.
123. Фоломин, А.И. Вопросы влажностного режима элементов ограждающих конструкций жилых и общественных зданий / А.И. Фоломин, Л.А. Кузина, Т.И. Костылева // В. кн.: Сборные железобетонные крыши. – Москва. – 1975. – Вып. 5. – С. 73-115.

124. Руководство по расчёту влажностного режима ограждающих конструкций зданий / В.И. Лукьянов, В.Р. Хлевчук, В.Г. Гагарин, В.А. Могутов. – Москва, 1984. – 168 с.

125 Александровский, С.В. Прикладные методы теории теплопроводности и влагопроводности бетона / С.В. Александровский. – Москва, 2001. – 186 с.

126. Kerestecioglu, A. Theoretical and Computational Investigation of Algorithms for simultaneous Heat and Moisture Transport in Buildings / A. Kerestecioglu. – Florida, 1989.

127. Кieß, К. Kapillarer und dampfformiger Feuchtetransport in mehrschichtigen Bauteilen. Diss / К. Кieß. – Essen, 1983.

128. Kunzel, H. Zusammenhang zwischen der Feuchtigkeit von Aussenbauteilen in der Praxis und der Sorptionseigenschaften der Baustoffe / H. Kunzel // Bauphysik. – 1982. – Jg. 4. – Н. 3. – P. 101-107.

129. Klopfer, H. Wassertransport durch Diffusion in Feststoffen / H. Klopfer. – Wiesbaden, 1974.

130. Каплун А.Б. Ansys в руках инженера: практическое руководство / А.Б. Каплун, Е.М. Морозова, М.А. Шамраева. – М.: Ленанд, 2024. – 272 с.

131. Рычков С.П. Моделирование конструкций в среде Femap with NX Nastran / С. П. Рычков. – М.: ДМК Пресс, 2016. – 784 с.

132. Коваленко А. В. Математическое моделирование физико-химических процессов в среде Comsol Multiphysics 5.2. Учебное пособие для вузов / А.В. Коваленко, А. М. Узденова. – Санкт-Петербург: Лань, 2021. – 228 с.

133. Строительная физика / Е. Шильд, Х.-Ф. Кассельман, Г. Дамен, Р. Поленц. – Москва: Стройиздат, 1982. – 296 с.

134. Нащокин, В.В. Техническая термодинамика и теплопередача / В.А. Нащокин. – Москва: Высшая школа, 1969. – 560 с.

135. Гусев, Н.М. Основы строительной физики / Н.М. Гусев. – Москва: Стройиздат, 1975. – 440 с.

136. Малыгина, О.А. Разработка математических моделей определения тепловлажностного режима ограждающих конструкций зданий при

нестационарном тепловом потоке / О.А. Малыгина // Современные проблемы гражданской защиты. – 2024. – № 3(52). – С. 93-104.

137. 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.

138. 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.

139. ГОСТ 24816-81. Материалы строительные. Методы определения сорбционной влажности. – Москва, Издательство стандартов, 1981. – 8 с.

140. ГОСТ Р 56504-2015. Материалы строительные. Методы определения коэффициента влагопроводности. – Москва, Стандартинформ, 2015. – 12 с.

141. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – Москва: Наука, 1976. – 280 с.

142. Зажигаев, Л.С. Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента / Л.С. Зажигаев, А.А. Кишьян, Ю.И. Романиков. – Москва: Атомиздат, 1978. – 232 с.

143. 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.

144. 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.

145. 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.

146. 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.

147. 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.

148. СНиП 2.01.01-82 «Строительная климатология и геофизика» – Москва: Стройиздат, 1983. – 139 с.

149. 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.

150. 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.

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

152. 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.

153. 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.

154. 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.

155. 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.

156. 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.

157. 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.

158. Постановление комитета тарифного и ценового регулирования Луганской Народной Республики от 25.06.2024 №1/3 «Об установлении тарифов на тепловую энергию, поставляемую теплоснабжающими организациями населению на территории Луганской Народной Республики с 01 июля 2024 г. по 30 июня 2025 г. – Луганск, 2024. – 11 с.

159. 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.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ЧАСТНОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«Луганский завод «САНТЕХДЕТАЛЬ»

ЛНР, 291020, г. Луганск, ул. Руднева, 50
Код ЕГРЮЛ: 61122846 ИНН9402004040
P/c 40702810609400323642 ПАО «ПРОМСВЯЗЬБАНК»
г. Ярославль БИК 044525555



ЧАСТНОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«Луганский завод «САНТЕХДЕТАЛЬ»

Тел.: (8572) 59 94 07
Тел:+7(959)148 66 97
Тел./факс: (8572) 934 514
e-mail: std-lg@mail.ru

исх. № 06/60 от «19» мая 2025 г.
на № _____ от « » _____ 2025 г.

«УТВЕРЖДАЮ»

Председатель правления
ЧАО «Луганский завод
«Сантехдеталь»



Иванов В.Г. В.Г. Андреев
19 мая 2025 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационной работы
Малыгиной Оксаны Александровны
«Повышение эффективности систем отопления совершенствованием
методов определения теплотехнических характеристик
ограждающих конструкций»

Комиссия в составе председателя – Лазарева Д.А., зам председателя правления и членов комиссии: Камбиева А.С., начальника цеха металлоконструкций и Смоляковой М.А., главного экономиста, рассмотрев диссертационную работу Малыгиной О.А. «Повышение эффективности систем отопления совершенствованием методов определения теплотехнических характеристик ограждающих конструкций», установила:

1. Диссертационная работа посвящена решению актуальной научно-практической задачи повышения эффективности систем отопления совершенствованием методов определения теплотехнических характеристик ограждающих конструкций, что обеспечивает повышение точности прогнозирования тепловых потерь и снижение приведенных затрат.

2. Научную новизну и практическое значение составляют следующие результаты: математическая модель тепловлагоденоса в четырехслойной ограждающей конструкции для расчета тепловых потерь систем отопления с учетом изменения влажности в процессе эксплуатации; аналитические вы-

ражения для коэффициентов теплопроводности и влагопроводности типовых теплоизоляционных материалов в зависимости от сорбционной влажности; методика моделирования теплотехнических характеристик четырехслойной ограждающей конструкции для прогнозирования тепловых потерь систем отопления; имитационная модель теплотехнических характеристик четырехслойной ограждающей конструкции в пакете программ COMSOL Multiphysics 6.2; результаты исследований теплотехнических характеристик и тепловых потерь четырехслойной ограждающей конструкции для типовых теплоизоляционных материалов IZOVOL, ТЕХНОФАС ПРОФ, ПЕНОПЛЕКС КОМФОРТ; анализ энергоэффективности и экономической целесообразности применения типовых теплоизоляционных материалов, а также рекомендации по повышению эффективности систем отопления.

3. Результаты и выводы диссертационной работы использованы и внедрены на ЧАО «Луганский завод «Сантехдеталь» при модернизации и обновлении систем отопления производственных участков и помещений.

4. Диссертационная работа Малыгиной О.А. «Повышение эффективности систем отопления совершенствованием методов определения теплотехнических характеристик ограждающих конструкций» является самостоятельным законченным исследованием, результаты которого представлены в виде научно-обоснованных рекомендаций, инженерных методик расчета, выполненных на современном научно-техническом уровне.

5. Ожидаемый годовой экономический эффект за счет снижения приведенных затрат на эксплуатацию системы отопления цеха металлоконструкций составляет 157,8 тыс. руб.

Председатель комиссии



Д.А. Лазарев

Члены комиссии:



А.С. Камбиев

М.А. Смолякова



**ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
ЛУГАНСКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ
«ЛУГАНСКВОДА»**

г. Луганск, Российская Федерация, Луганская Народная Республика, 291047
кв. Пролетариата Донбасса, 166
приемная тел: +7 (8572) 34-14-03, факс: +7(8572) 50-36-98
E - mail: office@lugvoda.com WEB: www.lugvoda.com

«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор
ГУП ЛНР «Лугансквода»



Р.Н. Каража
_____ 2025г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационной работы
Малыгиной Оксаны Александровны
«Повышение эффективности систем отопления
совершенствованием методов определения теплотехнических
характеристик ограждающих конструкций»

Комиссия в составе председателя – Мовчана С.В., заместителя генерального директора, и членов: Сундеева А.С., главного инженера, и Пустоварова В.Н., заместителя главного инженера, составила настоящий акт по факту использования и внедрения на ГУП ЛНР «Лугансквода» результатов диссертационной работы О.А. Малыгиной на тему «Повышение эффективности систем отопления совершенствованием методов определения теплотехнических характеристик ограждающих конструкций».

ГУП ЛНР «Лугансквода» были переданы:

- математическая модель тепловлагоденоса в четырехслойной ограждающей конструкции для расчета тепловых потерь систем отопления с учетом изменения влажности в процессе эксплуатации;
- аналитические выражения для коэффициентов теплопроводности и влагоденосности типовых теплоизоляционных материалов в зависимости от сорбционной влажности, что позволило повысить точность определения теплотехнических характеристик ограждающих конструкций;
- методика моделирования теплотехнических характеристик четырехслойной ограждающей конструкции с учетом изменения влажности в процессе эксплуатации для прогнозирования тепловых потерь систем отопления.

На основе представленных материалов комиссия установила следующее:

1. В диссертационной работе 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.

2. Практическая значимость исследования заключается в следующем.

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

Проведены 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.

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

3. Результаты диссертационной работы О.А.Малыгиной «Повышение эффективности систем отопления совершенствованием методов определения теплотехнических характеристик ограждающих конструкций» внедрены и используются на ГУП ЛНР «Лугансквода» при модернизации и совершенствовании систем отопления производственных участков и помещений, при разработке мероприятий по обновлению и развитию материально-технической базы предприятия.

Председатель комиссии

С.В. Мовчан

Члены комиссии:

А.С. Сундеев

В.Н. Пустоваров



«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ООО «НК-ПРОМЭКСПЕРТ»

Бондарь Н.В.

2025 г.

АКТ

о внедрении научных и практических результатов диссертационных исследований Малыгиной О.А. по теме «Повышение эффективности систем отопления совершенствованием методов определения теплотехнических характеристик ограждающих конструкций»

Научные и практические результаты диссертационных исследований Малыгиной Оксаны Александровны использованы при освидетельствовании теплотехнического состояния наружных ограждающих конструкций следующих зданий массовой застройки г. Луганска:

- 5-ти этажного кирпичного дома по адресу квартал Комарова, 18;
- 5-ти этажного кирпичного дома по адресу Красная площадь, 1;
- 5-ти этажного кирпичного дома по адресу улица В.В. Шевченко, 18;
- 5-ти этажного панельного дома по адресу квартал Солнечный, 12;
- 4-х этажного здания на квартале Комарова, 25;
- 3-х этажного кирпичного здания с вентилируемым фасадом по адресу улица газеты Луганская Правда, 151.

В ходе обследования применены:

1. Результаты имитационного моделирования температурных полей в слоях ограждающих конструкций зданий массовой застройки с учетом влияния увлажнения теплоизоляционного слоя.
2. Рекомендации по рациональному применению типовых утеплителей для повышения энергоэффективности и экономической целесообразности тепловой защиты зданий массовой застройки в условиях эксплуатации г. Луганска.

Настоящий акт составлен комиссией:

Главный инженер проекта

Инженер-проектировщик*

Соискатель

Кваша Г.М.

Баев Е.А.

Малыгина О.А.



**МИНИСТЕРСТВО
СТРОИТЕЛЬСТВА И ЖИЛИЩНО
КОММУНАЛЬНОГО ХОЗЯЙСТВА
ЛУГАНСКОЙ НАРОДНОЙ
РЕСПУБЛИКИ**

(МИНСТРОЙ ЛНР)

д. 38А, кв-л Шевченко Т.Г.,
г. Луганск, г.о. город Луганск,
Луганская Народная Республика,
291031, тел. факс: 8 (572) 58-58-54

e-mail: info@minstroy.lpr-reg.ru
https://minstroy.lpr-reg.ru

26.05.2025 № 6638/25-3

На № _____ от _____

В диссертационный совет 24.2.486.02 при
ФГБОУ ВО «Луганский
государственный университет
имени Владимира Даля»

СПРАВКА

об использовании результатов диссертационной работы
Малыгиной Оксаны Александровны
«Повышение эффективности систем отопления совершенствованием методов
определения теплотехнических характеристик ограждающих конструкций»

Министерством рассмотрены и изучены научно-прикладные результаты диссертационной работы Малыгиной О.А.:

- материалы 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;

- данные анализа энергоэффективности и экономической целесообразности применения типовых теплоизоляционных материалов для жилых зданий массовой застройки;

- 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.

Научно-прикладные результаты диссертационной работы Малыгиной О.А. рекомендованы к рассмотрению и использованию в работе подведомственных организаций и предприятий.

С уважением,

Врио министра



С.П. Дупленко

«УТВЕРЖДАЮ»

Ректор ФГБОУ ВО

«Луганский государственный
университет имени В. Даля»



проф. В.Д. Рябичев

«*mal*» 2025г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационной работы
Малыгиной Оксаны Александровны на тему
«Повышение эффективности систем отопления совершенствованием
методов определения теплотехнических характеристик
ограждающих конструкций»,
предоставленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 2.1.3 – Теплоснабжение, вентиляция,
кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение

Комиссия в составе председателя – Ремень В.И., к.т.н., доц., заместителя директора института строительства, архитектуры и жилищно-коммунального хозяйства Луганского государственного университета имени Владимира Даля (ИСА и ЖКХ), и членов: Копец К.К., к.т.н., и.о. зав. кафедрой вентиляции, теплогазо- и водоснабжения ИСА и ЖКХ «ЛГУ им. В. Даля», и Шевцовой Т.Е., старшего преподавателя кафедры вентиляции, теплогазо- и водоснабжения ИСА и ЖКХ «ЛГУ им. В. Даля» составила данный акт по факту использования в ЛГУ им. В. Даля результатов и выводов исследований, выполненных в диссертационной работе Малыгиной О.А. «Повышение эффективности систем отопления совершенствованием методов определения теплотехнических характеристик ограждающих конструкций».

При подготовке бакалавров по направлению 08.03.01 «Строительство» по профилям «Теплогазоснабжение и вентиляция», «Городское строительство и хозяйство», в дисциплинах «Централизованное теплоснабжение», «Основы энергосбережения» и «Энергосбережение в городском хозяйстве» и по специальности 08.05.01. «Строительство уникальных зданий и сооружений» по дисциплине «Строительная физика» используются следующие теоретические и экспериментальные данные по кандидатской диссертации Малыгиной Оксаны Александровны «Повышение эффективности систем отопления совершенствованием методов определения теплотехнических характеристик ограждающих конструкций»:

– математическая модель тепловлагопереноса в четырехслойной ограждающей конструкции для расчета тепловых потерь систем отопления с учетом изменения влажности в процессе эксплуатации;

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

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

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

– оценка энергоэффективности и экономической целесообразности применения теплоизоляционных материалов для жилых зданий массовой застройки.

С использованием представленных материалов, усовершенствованы методические комплексы дисциплин «Строительная физика», «Основы энергосбережения» и «Энергосбережение в городском хозяйстве» разработано методическое обеспечение для проведения курсовых, расчётно-графических и выпускных квалификационных работ.

Председатель комиссии

 Ремень В.И.

Члены комиссии:

 Копец К.К.

 Шевцова Т.Е.