

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ДРУЖБЫ НАРОДОВ ИМЕНИ ПАТРИСА
ЛУМУМБЫ»

На правах рукописи

Добшиц Виктор Львович

**МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ЧЕРЕЗ ОГРАЖДАЮЩИЕ
КОНСТРУКЦИИ ЗДАНИЙ ПРИ НАЛИЧИИ ТРЕЩИН**

2.1.1 – Строительные конструкции, здания и сооружения

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент К.П. Зубарев

Москва 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ ПРИ ПОВРЕЖДЕНИЯХ И ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ НЕОДНОРОДНОСТЯХ. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА.....	12
1.1. Исследования в области инъектирования ограждающих конструкций зданий при трещинах.....	12
1.2. Анализ методов расчета температурных полей ограждающих конструкций зданий при наличии теплотехнических неоднородностей.....	25
1.3. Оценка влияния трещин стен зданий на их тепловую защиту.....	31
1.4. Анализ экспериментальных подходов по определению сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций зданий.....	36
1.5. Выводы по главе 1.....	39
ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ СТЕН ЗДАНИЙ С ТРЕЩИНАМИ.....	41
2.1. Материал исследования. Здания с трещинами.....	41
2.2. Математическая модель теплопроводности для моделирования температурного поля стены здания с трещиной, заполненной инъекционным раствором, в двухмерной постановке.....	44
2.3. Математическое моделирование температурных полей стен зданий с трещинами, заполненными инъекционным раствором.....	46
2.4. Разработка номограмм удельных потерь теплоты для трещин в стенах здания, заполненных инъекционным раствором, по результатам математического моделирования температурных полей.....	55

2.5.	Алгоритм использования номограмм удельных потерь теплоты через трещины в стенах зданий, заполненные инъекционным раствором.....	59
2.6.	Выводы по главе 2.....	60
ГЛАВА 3.	МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ СТЕН ЗДАНИЙ С УСТАНОВЛЕННЫМИ В НИХ ПАКЕРАМИ.....	62
3.1.	Математическая модель теплопроводности для моделирования влияния пакеров на температурное поле стены здания в трехмерной постановке.....	62
3.2.	Математическое моделирование температурных полей стен зданий с установленными пакерами	64
3.3.	Разработка номограмм удельных потерь теплоты для пакеров по результатам математического моделирования температурного поля...	73
3.4.	Алгоритм использования номограмм удельных потерь теплоты через пакеры, установленные в стенах здания	75
3.5.	Выводы по главе 3.....	77
ГЛАВА 4.	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНЫХ ПОТЕРЬ ТЕПЛОТЫ, ПРОХОДЯЩИХ ЧЕРЕЗ ТРЕЩИНЫ СТЕН ЗДАНИЙ, ЗАПОЛНЕННЫЕ ИНЪЕКЦИОННЫМ РАСТВОРОМ.....	80
4.1.	Разработка подхода для определения удельных потерь теплоты, вызванных трещинами стен зданий.....	80
4.2.	Разработка экспериментального устройства для определения удельных потерь теплоты, вызванных трещинами стен зданий.....	82
4.3.	Описание проведения и обработки результатов экспериментального исследования.....	85
4.4.	Экспериментальное определение удельных потерь теплоты через стены здания при трещинах.....	90

4.5. Сопоставление результатов экспериментальных исследований по определению удельных потерь теплоты через трещины стен зданий с данными математического моделирования.....	93
4.6. Выводы по главе 4.....	100
ГЛАВА 5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИВЕДЕННОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧЕ СТЕН ЗДАНИЙ ПОСЛЕ ПРОВЕДЕНИЯ РЕМОНТА ТРЕЩИН С ПРИМЕНЕНИЕМ ИНЪЕКЦИОННОГО РАСТВОРА.....	102
5.1. Разработка уточненной формулы для определения сопротивления теплопередаче стен зданий с учетом отремонтированных трещин и установленных пакеров.....	102
5.2. Оценка необходимости утепления неутепленной стены здания в связи с ремонтом образовавшихся трещин.....	106
5.3. Оценка необходимости увеличения толщины слоя утеплителя стены здания в связи с ремонтом образовавшихся трещин.....	110
5.4. Алгоритм принятия решения о дополнительном утеплении стены здания после ремонта трещин с использованием инъекционного раствора.....	119
5.5. Выводы по главе 5.....	121
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	123
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	125
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Справки о внедрении результатов диссертационной работы.....	143
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Титульные листы патентов на изобретения и свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.....	145
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Список опубликованных научных работ	150

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования.

Трещины и повреждения влияют на энергосбережение здания. Энергосбережение и ресурсосбережение являются ключевыми направлениями в развитии строительной отрасли [10, 35, 45, 48, 61 - 64, 81, 93, 95, 121].

Совершенствование расчета теплопередачи стен зданий при наличии трещин является актуальной задачей, т.к. может уточнить энергопотребление зданий.

Степень разработанности темы исследования.

Трещины в ограждающих конструкциях зданий являются мультидисциплинарной проблемой, охватывающей различные научные сферы [9, 24, 31, 32, 84, 110]. Ведутся работы по созданию новых инъекционных растворов [4, 27, 36, 52, 54, 125], проводятся исследования их характеристик [11, 23, 99, 102, 119], разрабатываются методы ремонта поврежденных участков зданий и их инъектирования [20, 28, 38, 55, 56, 77], проводится анализ и построение моделей поврежденных объектов [34, 74, 103, 104, 117, 132].

В области разработки новых инъекционных растворов большой вклад внесли Естафьев Н.Ю. [27], Шубин Н.Е. [52], Харченко А.И. [54], Ситников А.М. [73], Ветюгов А.В. [51], Балицкий Д.А. [4], Sun N. [125] и др. Исследованиями характеристик инъекционных растворов занимались Быков А.А. [11], Грановский А.В. [23], Baltazar L.G. [99], Chuang P.M. [102], O.J. Oladiran [119], Kim T.K. и Park J.S. [109–111] и др. Развитием методов ремонта зданий при трещинах и способам инъектирования повреждений занимались следующие ученые Жадановский Б.В. [28], Еремеев П.В. [55], Сокова С.Д. [77], Смирнова Н.В. [75], Горелов А.В. [20], Ледина М.В. [38], Чубатов И.В. [88], Кобидзе Т.Е. [56] и др.

Наибольший интерес представляют исследования влияния трещин и дефектов оболочки здания на его температурное поле.

Одним из значимых направлений исследований ограждающих конструкций зданий при трещинах являются исследования влияния трещин на температурное поле зданий. Данной проблематикой занимаются Русанов А.Е. [61-64, 121], Кузнецов А.В. [10], Плотников А.А. [59], и Шаумаров С.С. [95] и др. Исследования ученых в основном сконцентрированы на определении влияния того или иного дефекта на энергосбережение, класс энергетической эффективности, значение температуры или проходящего через конструкцию теплового потока до его устранения. Влияние инъекционных растворов и пакеров на температурное поле ограждающей конструкции здания после проведения ремонта мало изучено. Данное обстоятельство, обосновывает дальнейшие исследования: исследовать задачу теплопроводности стенах зданий при наличии трещин, провести математическое моделирование и экспериментальную верификацию полученных данных, что предпринято в настоящей работе.

Цель исследования.

Разработка уточняющего метода расчета температурных полей при трещинах в ограждающих конструкциях стен зданий.

Задачи исследования.

1. Проведение обзора литературы по экспериментальным и расчетным способам определения температурного поля узлов ограждающих конструкций зданий;
2. Проведение математического моделирования температурных полей узлов ограждающих конструкций зданий с трещинами и пакерами, заполненными инъекционным раствором;
3. Разработка номограмм, позволяющих графически определять удельные потери теплоты через трещины и пакеры, заполненные инъекционным раствором, путем объединения массива результатов математического моделирования температурных полей узлов стен зданий, содержащих трещины и пакеры.

4. Разработка нового экспериментального устройства по определению удельных потерь теплоты стен зданий с трещинами, заполненными инъекционным раствором;

5. Проведение экспериментов на новом устройстве для верификации результатов математического моделирования узлов ограждающих конструкций зданий с трещинами, заполненными инъекционным раствором.

6. Разработка уточненной инженерной методики расчета приведенного сопротивления теплопередаче стен зданий, учитывающей трещины и пакеры, заполненные инъекционным раствором.

Объект исследования.

Стены зданий с трещинами.

Предмет исследования.

Метод расчета температурного поля стен зданий при трещинах

Научная новизна.

1. Разработаны номограммы для определения удельных потерь теплоты через трещины стен здания и пакеры, заполненные инъекционным раствором, на основании исследований температурного поля.

2. Предложен экспериментальный подход по определению потерь теплоты через трещины здания, заполненные инъекционным раствором;

3. Установлено, что для основания стен зданий из кладки из пенобетона и кладки из кирпича инъекционный раствор снижает приведенное сопротивление теплопередаче, а для стен зданий из железобетона – увеличивает.

Теоретическая значимость исследования.

Сконструированное экспериментальное устройство для определения удельных потерь теплоты через трещины здания, заполненные инъекционным раствором, может использоваться для различных образцов стен зданий из разных строительных материалов с различными трещинами.

Разработанные номограммы для расчета удельных потерь теплоты через трещины и пакеры стен здания, заполненные инъекционным раствором, могут использоваться для расчета различных типов стен зданий с трещинами.

Практическая значимость исследования.

Сконструированное экспериментальное устройство может использоваться исследовательскими лабораториями для определения удельных потерь теплоты через трещины стен зданий.

Разработанные номограммы для расчета удельных потерь теплоты через трещины и пакеры стен здания, заполненные инъекционным раствором, могут использоваться инженерами проектировщиками для расчета приведенного сопротивления теплопередаче.

Методология и методы исследования.

В теоретической части работы применен: метод конечных элементов для математического моделирования температурных полей зданий при трещинах.

В экспериментальной части исследования при статистической обработке экспериментальных данных применялся критерий Шапиро-Улика для проверки нормальности распределения. Для оценки влияния трещины на удельные потери теплоты использовался парный критерий Стьюдента. Отличия считались статистически значимыми при p -уровне значимости $p < 0,05$.

Положения, выносимые на защиту.

1. Результаты математического моделирования температурных полей при трещинах в стенах зданий и пакерах, заполненных инъекционным раствором, позволяющие определять удельные потери теплоты через отремонтированные узлы ограждающих конструкций в зависимости от ширины раскрытия и глубины трещин, а также от диаметров и глубины установки пакеров.

2. Экспериментальный подход по определению удельных потерь теплоты через трещину стены здания, заполненную инъекционным раствором, позволяющий верифицировать результаты расчета температурных полей ограждающих конструкций зданий.

3. Уточненная методика расчета приведенного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций стен зданий при трещинах.

Степень достоверности результатов.

Достоверность результатов математического моделирования обосновывается использованием фундаментального физического уравнения теплопроводности и его численным решением с помощью метода конечных элементов.

Достоверность результатов экспериментального определения удельных потерь теплоты через стены здания при трещинах, заполненных инъекционным раствором, достигается применением поверенного измерительного оборудования, статистической обработкой данных и воспроизводимостью результатов при повторных измерениях.

Апробация результатов.

Положения и результаты работы были доложены и обсуждены на конференциях:

1. II Международная научная конференция «Civil, Industrial and Urban Construction - 2025». (Санкт-Петербург, СПбПУ 2025 г.)

2. XVIII Международная научно-практическая конференция «Состояние и перспективы развития агропромышленного комплекса», секция зеленое строительство (конференция «ИНТЕРАГРО 2025»). (Ростов-на-Дону, ДГТУ 2025 г.).

3. XIX Международная научно-практическая конференция «Состояние и перспективы развития агропромышленного комплекса», секция зеленое строительство (конференция «ИНТЕРАГРО 2026»). (Ростов-на-Дону, ДГТУ 2026 г.).

Публикации.

По теме диссертации опубликовано 19 печатных работ, в том числе 14 – в рецензируемых журналах из «Перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора

наук», получено 4 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ, 1 патент России на изобретение.

Внедрения результатов.

Результаты настоящей работы внедрены в деятельность исследовательской лаборатории с построением экспериментального устройства и проведением на нем экспериментальных исследований для определения удельных потерь теплоты через трещины стен зданий, заполненные инъекционным раствором (справка о внедрении ООО «Строймат и К» от 01.06.2026 г.), а также в проектирование и строительство здания лесопилорамы (г. Подольск) с уточнением толщины теплоизоляционного слоя на основании расчета приведенного сопротивления теплопередаче с применением, разработанных в настоящем диссертационном исследовании, номограмм удельных потерь теплоты через трещины и пакеры, заполненные инъекционным раствором (справка ООО «Центр содействия строительству» от 03.06.2026 г.).

Личный вклад автора.

Личный вклад автора заключается в самостоятельном получении расчетных и экспериментальных результатов, представленных в диссертации, проведения обзора литературы по исследуемой теме, формулировке актуальности, цели, задач исследования, методов, методологии, научной новизны и положений, выносимых на защиту. Автор самостоятельно выполнил основную часть работы. Проведено математическое моделирование температурного поля стен зданий при трещинах и пакерах, заполненных инъекционным раствором. Результаты математического моделирования сведены в разработанные в диссертационном исследовании номограммы. Проведена верификация результатов расчетов с помощью экспериментов по определению удельных потерь теплоты через стены зданий при трещинах, заполненных инъекционным раствором, с разработкой и использованием нового экспериментального устройства. Проведен анализ полученных результатов, сформулированы практические рекомендации, перспективы дальнейшей разработки темы диссертации, подготовлены

публикации, проведена апробация результатов исследования и оформлена диссертация.

Соответствие паспорту специальности.

Диссертационное исследование соответствует паспорту специальности 2.1.1 – Строительные конструкции, здания и сооружения: п. № 5 – Обоснование технических решений по реконструкции, усилению и восстановлению элементов и конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений; п. № 9 – Разработка и развитие теоретических основ и методов расчёта ограждающих конструкций зданий и сооружений с учётом природноклиматических, теплофизических, светотехнических, акустических и иных условий.

Структура и объем работы.

Диссертация изложена на 153 страницах машинописного текста и состоит из: оглавления, введения, 5 глав, заключения, списка литературы, включающего 136 источников: 97 на русском языке и 39 на иностранных языках, приложений. Работа иллюстрирована 16 таблицами, 38 рисунками.

ГЛАВА 1. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ ПРИ ПОВРЕЖДЕНИЯХ И ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ НЕОДНОРОДНОСТЯХ. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

1.1. Исследования в области инъектирования ограждающих конструкций зданий при трещинах

Анализ научно-технической литературы показывает, что проблема восстановления и усиления ограждающих конструкций с трещинами решается комплексно, охватывая широкий спектр задач: от создания принципиально новых ремонтных составов и экспериментальной верификации их эффективности до разработки технологических схем производства работ и методов диагностики [9, 24, 31, 32, 84, 110]. При этом особое внимание уделяется не только механической прочности участка, который восстановили, но и стойкости к многократным температурно-влажностным воздействиям, что нужно учитывать при расчете для наружных ограждающих конструкций [37, 42].

Для систематизации накопленного опыта Кульков С.А. и Савич А.В. провели классификацию существующих полиуретановых инъекционных систем по признакам вязкости и механизму взаимодействия с водой, что дало возможность проектировщикам оперативно подбирать взаимозаменяемые аналоги без необходимости корректировки проектных решений. Данный подход особенно актуален в условиях импортозамещения, когда требуется быстрая замена материалов без потери качества. При этом авторы подчеркивают, что любая замена аналога должна сопровождаться проверкой совместимости по адгезии к конкретному типу основания — бетону, кирпичу или камню [36].

Естафьев Н.Ю. разработал наполненную двухкомпонентную полимерную систему холодного отверждения на основе отходов эпоксидной смолы, которая при нанесении на поверхность ячеистого бетона обеспечивает эффект «самозалечивания» за счет самопроизвольной пропитки пористого каркаса, что

ведет к многократному снижению водопоглощения и существенному росту прочности. Следует отметить, что использование отходов производства в качестве сырья для ремонтных составов одновременно решает задачи ресурсосбережения и снижения загрязнений. Эксперименты показали, что глубина пропитки таким составом достигает 15-20 мм, что в 3-4 раза превышает показатели традиционных эпоксидных составов [27]. Шубин Н.Е. и Гордеев А.С. предложили использовать низкотоксичную метакриловую композицию, которая позволяет уже через 2 часа после инъектирования достигать адгезионной прочности к бетону, превышающей когезионную прочность самого основания. Метакрилаты отличаются от эпоксидных смол низкой вязкостью – менее 50 мПа·с, что позволяет заполнять трещины раскрытием до 0,1 мм без принудительного нагнетания [52]. Для скоростного ремонта транспортных сооружений, требующего быстрого набора прочности, Sun N. с соавторами апробировали эпоксидный бетон на основе черной эпоксидной смолы, затвердевающий за 4–6 часов. Быстрое отверждение важно при восстановлении конструкций в условиях интенсивного движения и ограниченных технологических перерывов, в которые происходит застывание бетонной смеси. В ходе испытаний было установлено, что прочность такого бетона через 6 часов достигает 35 МПа, что позволяет разрешить движение легкового транспорта [125]. Харченко А.И. с соавторами успешно применили инъекционную смесь на основе бесклинкерного вяжущего из тонкомолотого доменного шлака, которая, по данным авторов, при натурных испытаниях на камерах шлюза гидротехнического сооружения позволила на 30 % превысить проектные требования по прочности [54]. Baltazar L.G. изучил потенциал геополимерных растворов на основе микрокремнезема. Геополимерные составы представляют интерес, потому что в них имеется пониженный углеродный след по сравнению с портландцементными смесями. Кроме того, они обладают высокой стойкостью к сульфатной агрессии, что позволяет проводить ремонт конструкций в грунтах с агрессивными водами. Данные составы не уступают традиционной гидравлической известке по прочности на сжатие, они демонстрируют почти вдвое более высокую адгезию к пористой

подложке [99]. Польские исследователи предложили быстротвердеющий бетон на основе низкоэмиссионного цемента СЕМ V с гибридным заполнителем из гранитного щебня и отходов натриево-известкового стекла, который показал прочность при сжатии свыше 90 МПа и высокую морозостойкость. Использование стеклобоя в качестве заполнителя решает проблему утилизации отходов и снижает себестоимость ремонтного состава. Морозостойкость такого бетона достигает F300, что в 1,5 раза выше требований для мостовых конструкций в умеренном климате [123].

В области гидроизоляции проводятся различные исследования. Ситников А.М. с соавторами разработали полимерцементную композицию, включающую портландцемент, метилметакрилат, фурановую и эпоксидную смолы, с расчетным сроком службы гидроизоляции 25-30 лет. Сочетание нескольких типов полимеров позволяет получить состав с множеством свойств: адгезией, эластичностью и химической стойкостью. Важным преимуществом является возможность нанесения на влажное основание, что важно для гидроизоляции подвальных и фундаментных конструкций [73]. Ветюгов А.В., Беленко Е.В. и Проскурин Д.В. создали бентонитовый структурообразователь, принципиальным отличием которого является выбор концентрации активирующей добавки (кальцинированной соды) в зависимости от мольного соотношения оксидов алюминия и кремния в исходном сырье, что обеспечило увеличение прочности геля и снижение водоотделения в 1,5-2 раза. Такой научно обоснованный подход к дозированию добавок позволяет адаптировать состав под конкретное сырье и добиваться стабильных результатов. В ходе экспериментального подтверждения было установлено, что оптимизированный состав снижает коэффициент фильтрации бентонитового геля до 10^{-9} м/с, что соответствует требованиям для противofильтрационных завес [51]. Особого внимания заслуживает исследование Балицкого Д.А. биоминерализующего состава с бактериями *Bacillus pumilus*, введение которого в цементную матрицу в количестве 8 % от массы вяжущего не только повышает прочность цементного камня на 8 %, но и создает эффект

пролонгированного «самозалечивания» трещин за счет осаждения кристаллов карбоната кальция. При помощи биоминерализации возможно создание саморемонтирующихся бетонов. Микроскопические исследования показали, что осажденный карбонат кальция имеет морфологию, близкую к кальциту, и плотно срастается с цементным камнем. Такое решение особенно ценно для труднодоступных подземных и гидротехнических сооружений. [4].

Параллельно с этим ведется поиск оптимальных комбинаций компонентов для достижения заданных свойств. В частности, Chuang P.M. с соавторами провели исследование смесей на основе портландцемента, сульфоалюминатного цемента (SAC) и ультрадисперсной реакционно-активной золы-унос (RUFA), которое показало, что оптимальный баланс прочности (до 45 МПа), минимальной усадки и высокой адгезии достигается при вязкости раствора ниже 80 мПа·с, а расширение этtringита при твердении компенсирует усадку портландцементной составляющей. Совместное использование SAC и RUFA позволяет управлять кинетикой твердения и снижает риск образования вторичных трещин. Рентгенофазовый анализ подтвердил, что в системе формируется преимущественно этtringитовая структура [102]. Важно отметить, что сравнительный анализ материалов различных производителей, проведенный Kim T.K. и Park J.S., выявил разброс свойств (по прочности, усадке) у инъекционных эпоксидных смол. Это указывает на необходимость предварительного тестирования конкретных партий материалов перед применением на объекте. В ходе исследования было установлено, что разброс прочности на отрыв для разных партий одного номинального состава может достигать 25%, что требует введения коэффициента надежности при проектировании [109–111].

В 2023 году Грановский А.В. с соавторами экспериментально установили, что инъектирование кирпичной кладки составами на основе эпоксидной смолы ЭД-20 с аминофенольным отвердителем позволяет увеличить ее прочность при сжатии в 2,2-2,3 раза, при этом разрушение происходит по телу кирпича [23]. При этом полиуретановый клей дает прирост прочности лишь на 17 %, а разрушение

наблюдается по клеевому шву, что объясняется его повышенной вязкостью и, как следствие, неполным заполнением дефектов. Таким образом, выбор типа инъекционного состава должен основываться не только на конечной прочности, но и на способности проникать в микротрещины и поры материала. Для кирпичной кладки рекомендованы составы с вязкостью не более 150 мПа·с, обеспечивающие заполнение пор и трещин на глубину не менее 50 мм от места инъекции [23].

О.Ј. Oladiran и О.А. Oguntola провели сравнительные испытания бетонных кубов с искусственными трещинами, которые показали, что после их заполнения эпоксидной смолой и набора прочности в течение 28 суток, прочность отремонтированных образцов не только восстанавливается, но и превышает прочность неповрежденного бетона. Этот эффект объясняется дополнительным армированием трещины полимером, работающим на растяжение. При этом максимальный эффект достигается при ширине раскрытия трещины 0,3-0,5 мм, где полимер образует непрерывную пленку с высокой адгезией [119]. Этот вывод подтверждается исследованием отечественных ученых, где при изгибе балок с трещинами после эпоксидного инъектирования полностью восстанавливалась их структурная целостность, хотя подчеркивалась критическая зависимость результата от подготовки поверхности: полимеризация должна проходить только в присутствии сухого воздуха [8]. При комбинировании методов Быков А.А. с соавторами получили более значительный эффект: в железобетонных балках, усиленных углепластиком в сочетании с инъектированием трещин, после ремонта полностью восстанавливается начальная жесткость, а изгибающий момент, при котором появляются трещины второго поколения, на 45-71 % превосходит эталонный. Комбинация инъектирования и внешнего армирования позволяет не только избавиться от дефекта, но и повысить несущую способность конструкции по сравнению с исходной. Экономическая оценка показала, что такой комбинированный метод на 30-40% дешевле полной замены конструкции при сопоставимом эксплуатационном ресурсе [11].

Стремление к экологичности привело к развитию методов биоминерализации. В Китае провели эксперименты с EICP-методом (осаждение карбоната кальция ферментами растений) на бетонных образцах, показавшие, что он способен обеспечить коэффициент восстановления прочности при сжатии до 98,41 % для тонких трещин раскрытием 0,3 мм, однако его эффективность закономерно снижается до 53,93 % при увеличении раскрытия до 1,0 мм. Ограничение по ширине раскрытия является общим недостатком большинства биоминеральных методов. Сканирующая электронная микроскопия показала, что при ширине трещины более 1 мм кристаллы карбоната кальция растут преимущественно на стенках, не смыкаясь в центре [113]. В качестве альтернативы, устраняющей проблему длительного циклического нагнетания, Chen Z. с соавторами предложили центробежный метод: синтез коллоидного карбоната кальция с последующей прямой инъекцией в виде концентрированной пасты, что позволило довести прочность восстановленного кирпича при изгибе до 122,9 % от прочности образца с незаполненной трещиной. Центробежный метод значительно сокращает время технологического цикла — до 30 минут на одну трещину длиной до 1 м [101]. Zhang X. с соавторами провели полевые же испытания на реальном объекте (в туннеле гидроэлектростанции) и выявили различия между микробным (MICP) и ферментным (EICP) подходами: первый обеспечивает более высокий выход карбоната кальция (93,75 %) за счет локализованной нуклеации на бактериальных клетках, тогда как второй дает более быструю кинетику осаждения. Для практического применения важен выбор метода исходя из доступного времени и требуемой степени заполнения трещин. В условиях ограниченного времени (менее 8 часов) предпочтителен EICP, а при возможности длительного выдерживания (более 24 часов) — MICP с более полным заполнением [135]. Совершенно иной физический принцип заложен в технологию электрофоретического осаждения, предложенную Wang Y., Wang C. и Zhou S., которая позволяет под действием электрического поля заполнить трещину толщиной 0,6 мм катионной эпоксидной смолой на глубину 16,5 мм за 24 часа, что

в итоге снижает глубину карбонизации с 5,2 до 0,48 мм и уменьшает водопоглощение в 3,5-15,6 раз. Электрофоретический метод перспективен для ремонта протяженных тонких трещин, куда гравитационное нагнетание невозможно. Напряженность электрического поля 5-10 В/см считается оптимальной: при меньших значениях скорость осаждения низка, при больших — возможен электролиз воды с образованием газовых пузырей [130].

Немаловажную роль играет поведение анкерных креплений в кладке с трещинами, что моделирует ситуацию крепления фасадных систем или оборудования. Tselios I. С соавторами установили, что само наличие трещины в растворном шве на 53 % снижает сопротивление химического анкера растяжению. Следовательно, перед установкой анкеров в поврежденной кладке необходимо инъектирование трещины. Эксперименты показали, что предварительное инъектирование трещины эпоксидным составом восстанавливает несущую способность анкера до 95% от значения для неповрежденной кладки [128]. S. Cattaneo и N. Vafa выяснили, что при циклическом нагружении, имитирующем сейсмическое воздействие, зависимость остаточной прочности анкера от ширины раскрытия трещины становится экспоненциальной; тем не менее, при раскрытии менее 1,0 мм характеристическое сопротивление все еще может достигать 75 % от ожидаемого в неповрежденной кладке. Для сейсмоопасных зон требуется дополнительное усиление анкерных узлов. Рекомендуется использовать анкеры увеличенной длины (не менее 15 диаметров) и дополнительное поперечное армирование зоны анкерования [100]. Ma X. с соавторами провели комплексное восстановление всей конструкции после сейсмического воздействия, включающее инъектирование трещин в бетоне эпоксидной смолой и последующее усиление углепластиком. Результаты показали, что это позволило не только восстановить утраченные свойства, но и увеличить горизонтальную прочность узлов на 33 % и энергоемкость разрушения на 85 %. Постсейсмический ремонт с применением комбинированных технологий может не только вернуть, но и увеличить исходную

несущую способность. Циклические испытания до 50 циклов показали отсутствие признаков усталостных повреждений в восстановленных узлах [116].

Жадановский Б.В. с соавторами разработали детальную пошаговую методику ремонта фундаментных плит: от устройства штрабы и установки инъекторов с обратным клапаном до завершающей чеканки шпуров гидроизоляционным материалом. Четкая регламентация операций снижает риск технологических ошибок. Рекомендуемое расстояние между инъекторами составляет 300-500 мм для трещин шириной до 1 мм и 500-800 мм для более широких дефектов [28]. Еремеев П.В., Еремеев Д.В., Еремеев В.П. запатентовали способ инъектирования изгибаемых элементов под нагрузкой, составляющей 60-80% от нормативной. Данный подход повышает трещиностойкость конструкции. Инъектирование под нагрузкой имитирует реальные условия эксплуатации и обеспечивает более равномерное распределение ремонтного состава. При этом нагрузка должна создавать в зоне трещины напряжения растяжения не более 50 % от предела прочности материала [55].

Сокова С.Д. и Смирнова Н.В. отметили, что при работе в грунтах и подземных сооружениях распространение получила двухстадийная технология с устройством дополнительной упорной стенки, предотвращающей неконтролируемое растекание бентонитовой смеси в окружающий массив. Упорная стенка ограничивает зону инъектирования и экономит материал. Толщина упорной стенки назначается не менее 100 мм из цементно-песчаного раствора марки не ниже М100 [77]. Для повышения эффективности Смирнова Н.В. предложила трехэтапную схему нагнетания, в которой предварительный нагрев гидроизоляционного состава до 40°C позволяет снизить давление нагнетания на 20 % и почти на 60 % сократить продолжительность технологических перерывов. Нагрев снижает вязкость и улучшает проникающую способность. Экспериментально установлено, что повышение температуры с 20 до 40 °C уменьшает динамическую вязкость бентонитовой суспензии с 80 до 35 мПа·с [75]. Для гидротехнических объектов Горелов А.В. и Мошков А.И. обосновали

применение быстросхватывающихся смесей на цементном вяжущем, время потери подвижности которых может регулироваться от 10 до 60 минут, а эффект расширения (до 8%) компенсирует усадку. Расширяющиеся цементы востребованы при ремонте подводных конструкций. Линейное расширение 0,2-0,3 % обеспечивает плотный контакт с основанием и исключает образование зазоров [20].

Ледина М.В. отметила, что при наличии же напорной фильтрации незаменимы полиуретановые смолы, нагнетаемые по одно- или двухстадийным схемам; в то же время для герметизации активных трещин, ширина которых циклично меняется, она рекомендовала применение «сшивки» поперечными анкерами с одновременным инъецированием эластичными составами. Эластичные составы предотвращают повторное раскрытие трещины при температурных деформациях. Удлинение при разрыве таких составов должно составлять не менее 100-150 % при прочности на разрыв 3-5 МПа [38].

Отдельного внимания заслуживает описанный Шевченко М.А. с соавторами опыт ремонта в условиях Крайнего Севера, где при температурах до -20°C была успешно применена система спиральных анкеров из нержавеющей стали, вклеиваемых на специальный зимний химический состав, что позволило реализовать пружинную модель работы кладки. На анкерах из нержавеющей стали не возникает электрохимическая коррозия в агрессивной среде противогололедных реагентов. Зимний клеевой состав дает возможность функционирования до -25°C и набирает 50 % прочности за 12 часов при отрицательной температуре [90].

Баженов Д.В. и Полянских И.С. сравнили методы восстановления и выяснили, что инъекционный метод выгодно отличается долговечностью (до 100 лет) и отсутствием земляных работ, в то время как электрофоретический метод является безальтернативным для памятников архитектуры, где недопустимы механические вмешательства. Для объектов культурного наследия главным критерием становится не стоимость, а сохранность оригинального материала. Электрофоретическое осаждение позволяет заполнять трещины без сверления отверстий и установки инъекторов, что исключает дополнительное повреждение

[3]. Чубатов И.В. разработал методику, вводящую в расчетную схему расширяющееся «тело внедрения» в форме сфероида, что позволило установить: схема нагнетания «снизу-вверх» более чем вдвое эффективнее традиционной схемы «сверху-вниз» за счет перераспределения перемещений в сторону свободной поверхности. Выбор методики в виде нагнетания существенно влияет на равномерность заполнения пор. При нагнетании снизу-вверх фронт раствора движется под действием избыточного давления и гидростатического напора, что снижает риск образования воздушных пробок [88]. Для сред с множественными трещинами Wang X. с соавторами построили модель «поро-трещинной среды», выявившую четыре различных типа изменения раскрытия трещин в зависимости от их ориентации и положения относительно места инъекции. Учет ориентации трещин позволяет оптимизировать расположение инъекторов. Для вертикальных трещин оптимальное расстояние между инъекторами на 20-30 % меньше, чем для горизонтальных при одинаковой ширине раскрытия [129]. Стремясь повысить ремонтпригодность тоннельных обделок, Кобидзе Т.Е. и Конюхов Д.С. предложили оригинальное решение по локальному секционированию воздушной прослойки водонепроницаемыми перемычками, формируемыми путем инъектирования через шпур, что ограничивает распространение воды пределами одной секции и резко сокращает объем ремонта. Секционирование позволяет разбить ремонтные работы в локальные. Размер секции рекомендуется назначать не более 10-15 м², чтобы при повреждении одной секции вода не распространялась на остальные [56]. Для оперативного же контроля за состоянием массивных сооружений в процессе компенсационного нагнетания Рубин О.Д. с соавторами создали специализированное программное обеспечение [69].

В.А. Пшеничкина и В.А. Кулаев отметили, что в более широком контексте восстановления зданий инъектирование является лишь одним из ключевых методов в ряду с такими, как увеличение сечения, применение композитных материалов и торкретирование. Выбор метода или их комбинации обосновывается технико-экономическим анализом. Для зданий со специальными архитектурными

требованиями предпочтительнее скрытые методы усиления, такие как инъектирование или внутреннее армирование [60]. Исследования показывают, что наивысший эффект достигается при их умелом сочетании. В частности, при физическом износе кладки более 20 % Величкин В.З. с соавторами признают наиболее эффективной комбинацию инъектирования цементно-полимерными составами с устройством стальной обоймы. Стальная обойма дополнительно стягивает кладку, предотвращая раскрытие новых трещин. Расчетное сопротивление комбинированной системы может быть увеличено в 1,5-2 раза по сравнению с исходной кладкой [12]. Веселов В.В. и Анцифиров А.И. предложили инновационную конструкцию усиления кирпичных простенков, где в горизонтальные швы кладки вклеиваются стеклопластиковые стержни, а наиболее нагруженная зона оборачивается углепластиковой тканью; такое решение в 2,5-4 раза легче традиционных обоев и на 10-30 % экономичнее. Снижение веса усиления уменьшает нагрузку на фундамент. Стеклопластиковые стержни имеют модуль упругости 40-50 ГПа, что близко к модулю упругости кирпичной кладки, и не создают концентрации напряжений [13, 53]. Для объектов культурного наследия, где любое вмешательство должно быть скрытым, высокую эффективность показали спиральные анкеры RSA, позволяющие сохранить архитектурный облик [92], а для восстановления аварийных башенных сооружений разрабатываются специальные ремонтно-реставрационные составы, максимально приближенные к историческим материалам по плотности и прочности. Совместимость ремонтного состава с оригинальным материалом предотвращает развитие новых дефектов [91].

Дорошин И.Н. с соавторами выяснили, что разработка алгоритмов предпроектного подбора решений и их технико-экономического обоснования позволяет еще на начальной стадии сократить продолжительность работ на 22-37 дней и денежные затраты на 3-5%. Предпроектный анализ окупается снижением непредвиденных расходов. Внедрение BIM-технологий на этапе предпроектного анализа сокращает время на подготовку документации на 15-20 % [26]. Для

оросительных каналов Гарбуз А.Ю. запатентовал комплексную технологию, где инъектирование полибентонитовой композицией труднодоступных пустот сочетается с нанесением покрытия из жидкой резины, что совместно позволило снизить фильтрацию в 13,7 раза и довести расчетный срок службы облицовки до 64,7 лет. Жидкая резина создает эластичный гидробарьер. Толщина покрытия из жидкой резины назначается не менее 2 мм в два слоя с армирующей сеткой между ними [19]. Аналогичным образом, в мостовых сооружениях Басов С.А. обосновал комплексный метод, объединяющий инъектирование трещин и внешнее армирование, что продлевает их ресурс без капитальной замены элементов. Такой подход востребован при ограниченном бюджете на реконструкцию. Продление ресурса на 15-20 лет при затратах 30-40 % от стоимости нового строительства [6]. Шашкин А.Г. с соавторами описали инженерную реставрацию Санкт-Петербургской консерватории, где устройство опытных участков по инъектированию бутовой кладки фундаментов на предпроектной стадии позволило с высокой точностью определить требуемый расход раствора, исключив перерасход или недостаточное заполнение пустот. Пилотное инъектирование – лучший способ калибровки параметров на уникальных объектах [89].

Современная диагностика все активнее опирается на методы автоматизированной обработки данных. Alogun J. Mc. с соавторами разработали устройство, позволяющее точно локализовывать образование новых трещин в бетоне. Раннее обнаружение трещины снижает стоимость ремонта. Устройство основано на измерении электрического импеданса и позволяет выявлять трещины раскрытием от 0,05 мм [117]. Dong X., Liu Y. и Dai J. Проводили исследования в области компьютерного зрения и усовершенствовали алгоритм YOLOv8-CD с модулями внимания и Ghost-свертками, который достигает точности обнаружения поверхностных трещин до 93,5 % при скорости обработки 88 кадров в секунду, делая возможной их идентификацию в реальном времени с борта мобильных устройств. Нейросетевые алгоритмы позволяют проводить обследования без участия эксперта на месте. Обучение сети проводилось на датасете из 15000

изображений трещин различных типов при различных уровнях освещенности [104]. Исследования Damiecka-Suchocka М. с соавторами доказали, что для исторических сооружений, где требуется особая аккуратность, высокую эффективность показывает сочетание фотограмметрии с беспилотных летательных аппаратов и наземного лазерного сканирования. Бесконтактные методы исключают риск повреждения хрупкой исторической кладки. Точность построения 3D-модели достигает 2-3 мм при использовании контрольных точек на фасаде [103]. Эта связка позволяет строить точные трехмерные модели с погрешностью до 5 мм, идентифицировать на них трещины и отслоения, а анализ интенсивности отраженного лазерного сигнала дополнительно дает возможность различать участки биологической коррозии, зоны насыщения влагой и следы предыдущих ремонтов, что было успешно продемонстрировано Xie L. с соавторами на городской стене XIV века в Нанкине [132].

В основе принятия решений по ремонту поврежденных конструкций должны лежать теоретические расчеты. Без поверочного расчета любое усиление остается эмпирическим. Нормативные подходы к расчету поврежденных конструкций требуют учета снижения модуля упругости и прочности в зоне дефекта [34, 74]. Для оценки остаточного ресурса критически важны данные о деградации материалов во времени. Модели деградации позволяют назначить оптимальный срок следующего ремонта [41].

Таким образом, практика регулярно подтверждает, что назначение технологии инъектирования является лишь финальным этапом длинной цепочки, начинающейся с детального анализа причин дефектов, инструментального определения фактических характеристик материалов и выполнения поверочных статических расчетов на основе полученных данных. Пропуск любого из этих этапов ведет к повторному появлению дефектов в короткий срок [2, 39, 41]. Только такой комплексный подход гарантирует надежность и долговечность принимаемых решений по восстановлению ограждающих конструкций [1, 15, 43, 46, 65, 103, 131].

Что касается организационно-технологических аспектов, то современные работы в этой области фокусируются на методах устранения трещин в железобетонных конструкциях. Жадановский Б.В. с соавторами разработали классификацию причин трещинообразования, охватывающую все этапы жизненного цикла, и предложили технологию инъекционных работ для трещин с раскрытием более 0,3 мм [28].

1.2. Анализ методов расчета температурных полей ограждающих конструкций зданий при наличии теплотехнических неоднородностей

Современная практика проектирования демонстрирует переход от упрощенных инженерных методик к расчету пространственных температурных полей. Это обусловлено широким распространением энергоэффективных многослойных конструкций, где традиционные одномерные модели дают большую погрешность. Кроме того, ужесточение требований к тепловой защите зданий: повышение нормируемого сопротивления теплопередаче до 3-4 м²·°C/Вт в умеренном климате, делает необходимым учет мостиков холода [7, 98]. Туснина О.А. и Туснина В.М. пришли к выводу, что трехмерное моделирование температурного поля дает значительно больше возможностей в сравнении с двухмерным. Трехмерные модели позволяют выявить локальные «мостики холода», невидимые в плоском сечении. Например, угловой стык трех панелей создает трехмерное теплопроводное включение, которое в 2D-модели разделяется на два независимых [83].

Для конструкций с ярко выраженной неоднородностью материала расчет температурных полей становится критически необходимым. Исследование утепленной наружной стены с монолитным железобетонным каркасом на основе методики Фокина К.Ф., проведенное Мыскиным С.М. с соавторами, показало, что расхождение в значениях коэффициента теплопередачи с расчетом по нормативной методике достигает 55 %, причем наибольшие отклонения наблюдаются в узлах, расположенных в местах неоднородности материала. Нормативные упрощенные

методы не учитывают пространственное перетекание тепла вокруг включений. Метод Фокина, основанный на аддитивности температурных полей, дает удовлетворительную точность только при коэффициенте теплотехнической однородности больше 0,7 [44]. Вытчиков Ю.С. с соавторами применили аналогичный подход к колодцевой кладке, где приведенное термическое сопротивление определялось комбинацией расчетов в двух направлениях с привлечением программы THERM 7.6, и при сопоставлении с данными натурного тепловизионного обследования тепловизором Therma CAM B2 выявили, что фактические значения сопротивления теплопередаче изменяются по поверхности стен в широких пределах – от 1,11 до 1,65 ($\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С}$)/Вт. Такой разброс подтверждает необходимость не только расчета, но и натурного подтверждения. На примере расчета авторы показали, что коэффициент теплотехнической однородности для колодцевой кладки составил 0,67, что ниже рекомендуемого значения 0,74 для данного типа конструкций [16].

Исследование конкретных видов теплотехнических неоднородностей позволяет количественно оценить их вклад в снижение теплозащитных свойств. Галаева Н.Л. провела численное моделирование, показавшее, что металлическая армирующая сетка в швах кладки, несмотря на небольшие удельные потери теплоты через единичный элемент, приводит к существенному ухудшению интегральных теплозащитных характеристик из-за высокого удельного геометрического показателя; в качестве альтернативы она предложила использование сеток из базальтового волокна. Базальтовая сетка имеет близкий к кладке коэффициент теплового расширения, что снижает риск трещин. Сравнительный расчет показал, что замена металлической сетки на базальтовую повышает приведенное сопротивление теплопередаче на 12-15% [17]. Проведенный этим же исследователем детальный анализ узлов опирания многопустотных плит перекрытия на стены из газобетонных блоков подтвердил, что подобные конструктивно-геометрические неоднородности вызывают неравномерное распределение температур и требуют совместного учета

прочностных и теплотехнических характеристик. В таких узлах часто возникает конденсат, ведущий к разрушению. Температура внутренней поверхности в зоне опирания плиты может быть на 3-5°C ниже, чем на основном поле стены, что в зимний период создает риск промерзания [18]. Математическое моделирование стационарного теплопереноса позволило Токаревой А.Н. с соавторами также количественно оценить влияние воздушной прослойки в многослойной стене на результирующее распределение температур. Оптимальная толщина воздушной прослойки составляет 20-40 мм; при меньших значениях конвекция не протекает, при больших – возрастают теплопотери. При толщине прослойки 20 мм конвективный коэффициент теплообмена составляет 0,5-1,0 Вт/(м²·К), а при 100 мм возрастает до 2,0-2,5 Вт/(м²·К) [82].

Значительное внимание уделяется анализу угловых зон как геометрических неоднородностей, наиболее подверженных промерзанию. Сазонов А.К. с соавторами провели трехмерное моделирование узла наружного угла здания в суровых климатических условиях в программном комплексе «Temper 3D». Это позволило выявить зоны с температурой ниже точки росы и предложить проектное решение, исключающее риск образования конденсата. По мнению авторов утепление наружных углов должно быть на 20-30 % толще, чем основной стены [66]. В результате численного исследования методом конечных элементов в комплексе FLEXPDE Е.А. Иванова и В.В. Пенявский показали, что для кирпичных стен температура в углу опускается существенно ниже точки росы, а устройство внутреннего утепленного скоса не позволяет полностью решить проблему, поскольку в углах, образованных скосом, минимальная температура сохраняется ниже критической. Внутреннее утепление без пароизоляции часто ухудшает ситуацию, смещая точку росы внутрь стены. Комбинированное утепление (снаружи 80 % толщины утеплителя, изнутри 20 %) снижает риск конденсации в углах в 2-3 раза по сравнению с чисто наружным утеплением [30].

При анализе точечных теплопроводных включений Е.А. Иванова и Н.В. Мещеулов установили, что материал коннекторов оказывает определяющее

влияние на тепловое состояние конструкции: металлические создают максимальное возмущение поля, тогда как стеклопластиковые практически его не искажают. Переход на стеклопластиковую арматуру может снизить линейные теплопотери на 40-50 % [29]. Для расчета удельных потерь теплоты через стальной гвоздь тарельчатого дюбеля М.М. Рыбаков и А.Е. Русанов показали возможность применения двумерного моделирования в ПК ELCUT, обеспечивающего расхождение с осесимметричной задачей порядка 2 %. Допустимость двумерной аппроксимации экономит вычислительное время при достаточной точности [61–64, 121]. В то же время для сложных узлов, где тепловой поток огибает неоднородность в двух плоскостях, требуется трехмерное моделирование. Например, Е.В. Пахоменко в ELCUT Professional выполнил расчет для платформенного стыка железобетонной панели с перфорацией. Перфорация уменьшает сечение теплопроводного включения, но требует проверки по прочности. Оптимальное сечение перфорации составляет 15-20 % от площади стыка, что снижает теплопотери на 40-60 % при сохранении несущей способности [58]. Численное исследование сложного линейного мостика холода в зоне цокольного узла здания с однослойными стенами, проведенное Jezierski W. с соавторами в программе THERM 7.6, позволило не только рассчитать температурные поля для 27 вариантов сочетания факторов, но и построить на их основе математические модели минимизации теплопотерь. Оптимальная конструкция цокольного узла может снизить теплопотери на 15-20 % без изменения толщины стены [108].

Самарин О.Д. выявил, что метод конечных элементов позволяет моделировать конструкции практически любой геометрической сложности, тогда как аналитические методы, основанные на теории источников и стоков, дают точное решение в рамках принятых допущений и обеспечивают высокую скорость вычислений, но ограничены узким классом задач с простой геометрией границ. Аналитические решения полезны для контроля численных моделей и обучения. Например, для однородной стенки с цилиндрическим включением аналитическое решение в виде рядов Бесселя дает эталонное значение [67, 68].

Обращаясь к моделированию нестационарных тепловых режимов, следует выделить метод наложения тепловых волн, примененный Мерциевым А.А. с соавторами для помещения с деревянными стенами. Разработанная математическая модель, учитывающая суточные колебания температуры и солнечную радиацию с линеаризацией граничных условий, показала, что защита от прямых солнечных лучей через оконный проем позволяет на треть снизить пиковые затраты на кондиционирование. В летний период учет солнечной радиации важен для остекленных фасадов. Амплитуда колебаний температуры внутреннего воздуха может быть уменьшена в 2-3 раза при использовании внешнего затенения [39, 40].

Среди зарубежных исследований выделяются работы, сочетающие инфракрасную термографию с тепловым моделированием [127]. Коо В.К. с соавторами разработали модульную диагностическую систему, объединяющую термографию, панорамную реконструкцию и семантическую сегментацию на основе глубокого обучения. Нейросетевая сегментация автоматически выделяет дефектные зоны на термограммах [112].

Анализ периметральных зон офисного здания в Сеуле на основе моделирования в IES VE и натурных измерений зафиксировал максимальные тепlopоступления при западной ориентации фасада, где пиковая температура на внутренней поверхности остекления достигала 40 °C. Западные фасады требуют обязательного наличия солнцезащиты в жарком климате [114]. Iavorschi E. с соавторами провели экспериментально-численное исследование двойного стеклянного фасада в ANSYS Fluent, которое выявило нелинейный закон изменения температуры по высоте. Вентилируемый двойной фасад эффективно снижает перегрев верхних этажей. Разница температур между низом и верхом фасада может достигать 10-15 °C при высоте здания 50 м [107].

Zhangabay N. с соавторами провели экспериментально-численное исследование адаптивной системы стен с регулируемой воздушной прослойкой в ANSYS, на основе которого сделали вывод, что зимой адаптивная конфигурация

повышает температуру внутренней поверхности на 1,5-2,3 °С, а летом естественная конвекция в вертикальных каналах обеспечивает эффективный отвод теплоты. Адаптивные системы требуют автоматического управления заслонками для смены режима [136].

Используя CFD-моделирование влияния теплоты от систем кондиционирования, Fan С., Chen J. и Yu P. показали, что вертикальная стратификация температуры приводит к различиям в энергопотреблении между этажами до 7,8 %. Учет стратификации важен для высотных зданий [105]. Хуе Х. с соавторами исследовали конвективный коэффициент теплообмена на основе CFD и верификации в аэродинамической трубе. Это позволило получить критериальные уравнения для различных поверхностей здания. Полученные уравнения уточняют расчеты теплотерь для реальных ветровых условий [133].

В части нормативных методик Семекин П.В. с соавторами сопоставили тепловизионную съемку и трехмерное моделирование в COSMOS DesignStar для жилого дома в Новосибирске и показали, что натурные обследования при температурах выше расчетных не выявляют всех зон возможной конденсации, и требуется обязательное дополнение измерений теплотехническими расчетами. Экстраполяция результатов измерений на расчетные температуры должна выполняться с помощью верифицированной модели. Коэффициент пересчета для температурного поля не линеен, и простая экстраполяция по пропорции может дать ошибку до 30 % [72]. Сравнительный анализ пенополистирола и минеральной ваты в ArchiCAD 19, проведенный Ярцевым В.П. с соавторами, выявил лучшие показатели пенополистирола в зонах с теплотехническими неоднородностями при разнице по энергетическим показателям 2,6 %. Пенополистирол менее чувствителен к увлажнению, что важно в зонах мостиков холода. Коэффициент теплопроводности минеральной ваты при увлажнении на 5 % по объему возрастает на 30-40 %, тогда как у пенополистирола — только на 5-10 % [96, 97]. Для светопрозрачных конструкций Дацюк Т.А. и Соколов А.Н. предложили калориметрический метод, обеспечивающей втрое более высокую точность

измерений по сравнению с климатическими камерами [25]. Наконец, проведенное Sun, Y. и соавторами экспериментальное исследование полуподземного хранилища в холодном аридном регионе с применением иерархической кластеризации и ансамблевой модели AdaBoost позволило сократить число датчиков мониторинга на 87 % при сохранении точности восстановления температуры. Машинное обучение оптимизирует сети мониторинга для больших сооружений [126].

Таким образом, для конструкций с теплотехническими неоднородностями нужны разные инструменты: от аналитических и упрощенных инженерных методик до сложных трехмерных нестационарных моделей. Глубина проработки модели должна соответствовать сложности конструкции и требуемой точности. Сочетание натурных измерений с верифицированными численными расчетами обеспечивает получение достоверных данных для обоснованного проектирования тепловой защиты зданий [106, 115, 118, 120, 124, 132, 134].

1.3. Оценка влияния трещин стен зданий на их тепловую защиту

Трещины в наружных стенах способны оказывать существенное влияние на теплозащитные характеристики ограждающих конструкций. Это влияние носит двухкомпонентный характер: снижение термического сопротивления за счет замещения материала воздухом и фильтрация воздуха через сквозной дефект. Дополнительно трещина может служить местом сосредоточения влаги, что при замерзании вызывает прогрессирующее разрушение. Сквозные трещины создают дополнительные мостики холода. При ширине раскрытия более 0,5 мм конвективная составляющая начинает преобладать. По результатам эксперимента авторов, при скорости ветра 5 м/с и перепаде давления 10 Па расход воздуха через трещину 1x1000 мм достигает 10-15 м³/ч, что эквивалентно теплотерям 15-20 Вт на метр трещины. Оценки на основе моделирования температурных полей показывают, что при появлении трещин сопротивление теплопередаче стены падает в разы, опускаясь значительно ниже требуемых санитарно-гигиенических значений. При этом утепление стен без предварительной ликвидации трещин

приводит к смещению зоны конденсации к внутренним слоям конструкции, что создает риск отслоения и разрушения отделочного слоя. Конденсат в утеплителе при отрицательных температурах разрушает его волокна и снижает теплозащиту. Влажный утеплитель теряет до 50 % своих теплоизоляционных свойств [93].

Щипачева Е.В. и Шаумаров С.С. выполнили теоретический анализ влияния трещин на тепловой режим на основе математической модели здания как единой теплоэнергетической системы. Учет движущейся воздушной среды в трещине потребовал от них модификации классического уравнения теплопроводности. Вводятся дополнительные члены, описывающие конвективный перенос тепла воздушным потоком. На основе решения уравнений Навье-Стокса исследователи получили зависимость расхода воздуха через трещину от перепада давления и геометрических параметров дефекта. При перепаде давления 10 Па (типовое значение для 10-этажного здания) расход через трещину 0,5x1000 мм может достигать 5-7 м³/ч. Для зданий высотой более 25 м перепад возрастает до 20-30 Па, увеличивая расход в 1,5-2 раза. Расчеты показали, что при малой ширине раскрытия расход воздуха незначителен, но с ее увеличением он резко возрастает. Аналитическое решение для температурного поля в ограждении с трещиной выявило, что температура на внутренней поверхности может опускаться ниже точки росы, создавая условия для конденсации. Конденсат на внутренней поверхности ведет к развитию плесени и грибка. При относительной влажности воздуха 60% и температуре поверхности 12 °С уже возможно выпадение конденсата [95].

Аналогичные процессы наблюдаются в зонах с воздухопроницаемостью, превышающей нормативные значения, где дополнительные тепловые потери возникают за счет нагрева инфильтрующегося холодного воздуха. Разность между тепловыми потерями на инфильтрацию и трансмиссионной составляющей может достигать 30 % в многоэтажных зданиях. Тихомиров С.А. и Тихомиров К.С. в результате численных и натурных исследований с тепловизионным контролем показали, что пустоты в зонах примыкания оконных блоков к стенам приводят к

образованию теплопроводных включений, выявляемых по температурному перепаду на внутренней поверхности. Для диагностики таких дефектов они предложили комбинированный метод, дополняющий стандартные методики тепловизионным анализом [81].

Дефекты тепловой защиты навесных фасадных систем ведут к значительному снижению сопротивления теплопередаче. Навесные системы с вентилируемым зазором особенно чувствительны к нарушению циркуляции воздуха. При зазоре менее 20 мм или полном его перекрытии сопротивление теплопередаче зазора существенно снижается. Статистический анализ данных тепловизионного контроля, проведенный Русановым А.Е. с соавторами, показал, что более половины конструкций имеют дефекты, большая часть которых сосредоточена в узлах примыкания оконных блоков. Лабораторные эксперименты в климатической камере подтвердили, что в зависимости от вида дефекта сопротивление теплопередаче может снижаться вплоть до двух раз, а наиболее критичным является отслоение утеплителя от основания. Исследователи построили математические модели совместного влияния дефектов для корректировки энергетического паспорта здания. Совместный учет нескольких дефектов дает дополнительный эффект, превышающий сумму отдельных дефектов [121]. Достоверность такого подхода была подтверждена в лабораторных исследованиях фрагментов ограждающих конструкций с навесной фасадной системой. Эксперименты воспроизводили типичные дефекты, такие как зазоры в стыках плит утеплителя и зазоры между утеплителем и кронштейном. Математическое моделирование в программе ELCUT показало хорошую сходимость результатов расчета с лабораторными данными, подтвердив применимость численных методов для прогнозирования влияния дефектов без длительных натурных испытаний [61, 62]. Дальнейшие исследования оценили влияние уже одиннадцати факторов и показали, что наиболее сильное негативное воздействие оказывает отслоение теплоизоляции от основания [63].

Результаты натурных обследований монолитных зданий в Санкт-Петербурге, проведенных Кузнецовым А.В., подтверждают связь между образованием трещин и нарушением теплозащиты. Повреждения в виде трещин и разрушений лицевого слоя локализованы преимущественно в зонах сопряжения перекрытий с наружными стенами и вызваны температурно-климатическими воздействиями. Циклы «замораживание-оттаивание» вызывают разрушение материала в зонах концентрации напряжений. Для Санкт-Петербурга характерно до 80-100 циклов замерзания-оттаивания за зиму, что ускоряет развитие трещин. Тепловизионная съемка и инструментальные измерения выявили в этих узлах температуры, не соответствующие санитарно-гигиеническим требованиям. Температура на внутренней поверхности в углах может быть на 5-7 °С ниже, чем на остальной стене [35]. Аналогичные проблемы зафиксировали Бузало Н.А. с соавторами при обследовании школьных зданий в Ростовской области, где трещины в местах сопряжения стен сопровождаются разрушением кладки цокольной части из-за циклов замораживания-оттаивания. Они отмечают, что разрушение простенков наружных стен может быть следствием конденсации влаги из эксфильтрирующегося воздуха. Эксфильтрация влажного воздуха из помещений зимой – частая причина внутренней коррозии кладки. При нарушении пароизоляции через трещины может выходить до 0,5-1,0 л воды на 1 м² стены за отопительный сезон [10].

Плотников А.А. выявил, что одним из ключевых механизмов образования трещин являются температурные деформации. Анализ примеров из строительной практики показывает, что жесткое сопряжение элементов без учета температурных перемещений ведет к циклическому раскрытию трещин. В условиях Крайнего Севера при годовых перепадах температуры до 100 °С деформации длинномерных конструкций могут достигать десятков миллиметров, что требует обязательного устройства температурных швов. При отсутствии швов возникают либо продольные трещины, либо выпучивание. Рекомендуемый шаг температурных

швов для железобетонных зданий в условиях Крайнего Севера составляет 30-40 м, что в 1,5-2 раза чаще, чем для умеренного климата [59].

Повреждения штукатурного покрытия фасадов исторических зданий также имеют теплофизическую природу. Обследования в Санкт-Петербурге, проведенные Р.Б. Орловичем с соавторами, показали, что более чем у половины объектов есть повреждения, а основным механизмом разрушения является давление замерзающей воды в зазоре между штукатуркой и кладкой, сопоставимое с прочностью сцепления материалов. При замерзании вода расширяется на 9 %, создавая давление до 200 МПа. Прочность сцепления штукатурки с кладкой обычно составляет 0,3-0,5 МПа, поэтому даже однократное замерзание приводит к отслоению. Наиболее интенсивное отслоение происходит весной, когда резкое высыхание вызывает усадочные деформации, превышающие набухание при увлажнении [48].

Проблема трещинообразования актуальна и для новых технологий, в частности для 3D-печати полистиролбетоном. Чиркунов Ю.А. и соавторы отметили, что причиной образования трещин является резкое вспучивание гранул полистирола при нагреве смеси, в то время как цементная матрица теряет пластичность. Математическое моделирование позволило им выявить условия, при которых образование трещин становится неизбежным. Контроль температуры экструзии важен для бездефектной печати. Оптимальный температурный диапазон для полистиролбетона составляет 20-25 °С, превышение на 10 °С увеличивает риск трещин в 3-4 раза [87].

Для системного решения проблемы Наумов А.Е. с соавторами предложили концепцию управления жизненным циклом дефектов ограждающих конструкций. Они разработали параметрическую модель трещины, интегрируемую в информационную модель здания и позволяющую отслеживать динамику развития дефекта во времени. BIM с привязкой к IoT-датчикам позволяет прогнозировать рост трещины на 6-12 месяцев вперед. Использование волоконно-оптических датчиков деформации с точностью ± 1 мкм/м обеспечивает раннее обнаружение

начала раскрытия трещины. Такой подход создает основу для своевременного мониторинга и предотвращения снижения теплозащитных свойств ограждающих конструкций [45].

1.4. Анализ экспериментальных подходов по определению сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций зданий

Экспериментальные методы определения сопротивления теплопередаче подразделяются на лабораторные испытания и натурные обследования, причем нормативную базу для обоих подходов формируют государственные стандарты. ГОСТ 26254-84 устанавливал методику, основанную на создании условий стационарного теплообмена и измерении температуры воздуха, температуры поверхностей конструкции и плотности теплового потока, а для конструкций с неоднородными участками определяется приведенное сопротивление теплопередаче. Стационарный метод требует длительной выдержки (до 72 часов), что ограничивает его применение. Погрешность метода при соблюдении всех условий составляет $\pm 5-7\%$ [21]. ГОСТ Р 59939-2021 регламентирует два метода испытаний – для стационарных и для нестационарных натуральных условий, и предусматривает пересчет измеренных значений температуры внутренней поверхности на расчетные условия с учетом температуры наиболее холодной пятидневки. Пересчет на расчетные условия требует знания точной теплоемкости конструкции [22].

Одним из наиболее наглядных методов натуральных исследований теплозащитных свойств является инфракрасная термография. Термография позволяет визуализировать распределение температур на поверхности с высоким разрешением: до $0,05^{\circ}\text{C}$ для современных тепловизоров. Проведенный Волгиным А.Л. с соавторами сравнительный анализ наружных стен жилых домов, построенных по различным технологиям, позволил выявить характерные зоны теплопотерь, общие для всех типов зданий: узлы примыкания углов, подвальные части и зоны сопряжения оконных блоков. Эти три зоны дают до 80 % всех

теплопотерь через оболочку здания. При этом для кирпичного дома они зафиксировали неравномерность температурного поля фасадов, а в трехслойных панелях выявлены теплопроводные включения в зонах дискретных связей по периметру панелей. На основе полученных данных исследователи сформулировали рекомендации по повышению теплозащиты и сделан вывод о целесообразности проведения периодических тепловизионных обследований после пяти лет эксплуатации. Пятилетний цикл совпадает с началом проявления скрытых дефектов утепления [14].

Инструментальные измерения на жилом доме в Новосибирске при температуре наружного воздуха около $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ позволили зафиксировать температуры ниже точки росы лишь в локальных точках – в углах примыкания оконных переплетов и перегородок. Однако последующее моделирование методом конечных элементов в программе COSMOS DesignStar при расчетной температуре $-37\text{ }^{\circ}\text{C}$ выявило дополнительные проблемные зоны в углах сопряжения стен и плит перекрытий [72].

Испытания в климатических камерах, широко применяемые для экспериментального определения теплозащитных свойств, сопряжены с рядом проблем, снижающих точность результатов. К ним относятся сложность корректного измерения линейных теплопотерь в местах примыкания элементов, трудность точного обеспечения нормативных коэффициентов теплообмена на поверхностях и зависимость от квалификации оператора при установке датчиков. Краевые эффекты в камере могут искажать результаты для образцов размером менее 1,5 м. Рекомендуемый минимальный размер образца для климатической камеры составляет 2,0x2,0 м [25].

В области лабораторных методов представляет интерес исследование Sassine Е. с соавторами, в котором они сопоставили различные подходы к определению теплотехнических свойств на примере кирпичной кладки старых зданий. Первый подход основан на поэлементном измерении свойств кирпича и раствора с последующим расчетом эквивалентных характеристик методом электрической

аналогии, а второй заключается в испытаниях фрагмента реальной стены с использованием лабораторной камеры. Сравнение результатов, полученных двумя методами, показало высокую сходимость с расхождением около 2 % для термического сопротивления и около 4 % для теплоемкости, что, по мнению авторов, подтверждает приемлемость обоих подходов. Поэлементный метод дешевле и может применяться при невозможности вырезки крупного фрагмента [122].

Внедрение технологий информационного моделирования в практику обследований существенно повышает эффективность сбора и обработки данных о дефектах [33, 46, 47, 49, 50, 85, 94]. Бармотин А.А. с соавторами разработали методику применения ПК Autodesk Revit при обследовании ограждающих конструкций многоэтажного монолитного здания, позволяющую создавать параметрические семейства дефектов для каждого типа конструкций и наносить их непосредственно на 3D-модель. Такой подход оптимизирует составление отчета, исключает ручной подсчет объемов и обеспечивает динамическое отслеживание текущего состояния ограждающих и несущих элементов. Динамическая модель позволяет визуализировать развитие дефектов во времени [5].

Программа «Анализ износа строительных конструкций», разработанная Синякиным Д.С., реализует процесс оценки технического состояния с выявлением трещин и деформаций, используя сбор данных с датчиков, визуальный осмотр и неразрушающие методы контроля, включая термографию, что позволяет оценивать степень износа и прогнозировать остаточный ресурс. Прогноз остаточного ресурса базируется на кинетических моделях деградации [71]. Другая программа, разработанная Сабитовым Л.С. с соавторами, «Структура-аналитик», предназначена для комплексной оценки частично разрушенных гражданских зданий после чрезвычайных ситуаций и выполняет анализ состояния стен, перекрытий и кровли с учетом процента повреждения и ширины трещин, обеспечивая инженерно обоснованное принятие решений о дальнейшей

эксплуатации или ремонте. Для аварийных зданий важна скорость оценки, что обеспечивается автоматизацией [70].

Черныши А.С. и Поляков А.И. предложили методику, согласно которой дефекты фиксируются тепловизором в виде зон аномального теплового излучения, а съемка может проводиться как стационарными сканерами, так и с применением беспилотных аппаратов. БПЛА с тепловизором позволяют обследовать фасады высотных зданий без люлек. Максимальная высота обследования для квадрокоптера составляет 120-150 м при наличии стабилизации изображения [86].

При обследовании крупнопанельного жилого дома первой массовой серии, выполненного с целью приведения теплозащитных свойств к современным требованиям, Пафнутьев И.С. и Прядко Н.В. выявили отслоение облицовочной плитки и выпадение раствора из стыков стеновых панелей. Дефекты стыков панелей – основной путь инфильтрации воздуха в крупнопанельных домах. Воздухопроницаемость стыков без герметизации может достигать 10-15 кг/(м²·ч), что в 20-30 раз превышает нормативные значения. Для оценки теплозащитных свойств они отобрали пробы материала, что позволило установить коэффициент теплопроводности, а выполненный ими теплотехнический расчет показал значительное отставание существующего сопротивления теплопередаче от нормативного значения. Коэффициент теплопроводности старого бетона может быть на 20-30 % выше паспортного из-за увлажнения и карбонизации [57].

Таким образом, современные экспериментальные подходы к определению сопротивления теплопередаче развиваются в направлении комплексного сочетания натурных измерений, тепловизионной диагностики, численного моделирования и технологий информационного моделирования. Интеграция этих методов позволяет получать достоверные данные для энергоаудита и проектирования ремонта

1.5. Выводы по главе 1

Анализ исследований в области инъектирования ограждающих конструкций при трещинах показал, что данное направление развивается комплексно и

охватывает широкий спектр задач: от создания новых ремонтных составов с узкоспециализированными свойствами до разработки технологических схем производства работ и методов диагностики. При этом ключевым трендом является переход от универсальных составов к оптимизированным под конкретный тип дефекта и материал основания. Отмечена также тенденция к использованию вторичных ресурсов: отходы эпоксидных смол, доменный шлак, стеклобой, в ремонтных составах, что соответствует принципам циркулярной экономики.

Для сложных неоднородных конструкций численное моделирование остается универсальным инструментом, в то время как аналитические методы могут служить эффективным средством экспресс-оценки и верификации численных решений. Выбор между 2D и 3D моделированием диктуется геометрией неоднородности: для протяженных элементов достаточно 2D, для точечных необходим 3D. Разработанные и верифицированные модели температурных полей позволяют прогнозировать зоны конденсации и промерзания на этапе проектирования. Сочетание натурных теплофизических измерений с верифицированными численными моделями обеспечивает получение достоверных данных для обоснованного проектирования тепловой защиты.

Влияние трещин стен зданий на их тепловую защиту велико. В ряде случаев появление трещин приводит к значительному падению сопротивления теплопередаче – в два-три раза относительно неповрежденного участка.

Изучение экспериментальных подходов к определению сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций показало, что современные методы развиваются в направлении комплексного сочетания натурных измерений, тепловизионной диагностики, численного моделирования и технологий информационного моделирования.

ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ СТЕН ЗДАНИЙ С ТРЕЩИНАМИ

2.1. Материал исследования. Здания с трещинами

Трещины в ограждающих конструкциях зданий образуются по разным причинам и могут иметь различные геометрические размеры. Для определения диапазонов, в которых могут изменяться размеры трещин, было проведено натурное обследование 23 зданий разного назначения в разных районах строительства. Проводилась фотофиксация зданий с трещинами.

Примеры обследованных зданий представлены на рисунке 2.1.



Рисунок 2.1. Примеры обследованных зданий (а – пилорама (город Подольск); б – контрольно-пропускной пункт (город Печоры); в – индивидуальный жилой дом (город Москва)).

Материалом основания обследованных ограждающих конструкций стен зданий были кирпич, пенобетонный блок и железобетон. Было обследовано 8 зданий с материалом основания стены – кирпич, 9 зданий с материалом основания стены – железобетон, 6 зданий с материалом основания стены – пенобетон.

Представлено распределение количества обследованных зданий в зависимости от материала основания стены здания (таблица 2.1).

Таблица 2.1. Распределение количества обследованных зданий в зависимости от материала основания стены здания

Материал основания стены здания	Количество обследованных зданий
Кирпич	8
Железобетон	9
Пенобетон	6

В ходе натурного обследования были выявлены трещины в стенах зданий. Представлены результаты фотофиксации трещин (рисунок 2.2).



Рисунок 2.2. Результаты фотофиксации трещин (а – трещина в стене из кирпичной кладки; б – трещина в стене из железобетона; в – трещина в стене из блоков из пенобетона).

В результате обследования было выявлено, что по глубине трещины могут быть как небольшими в пределах нескольких миллиметров, так и сквозными, проходящими через всю конструкцию. Ширина раскрытия трещины тоже может быть различной: от долей миллиметра до нескольких миллиметров. Длина каждой отдельной трещины в обследованных зданиях варьировалась от нескольких сантиметров до нескольких метров.

Для устранения трещин используется метод инъецирования. В стену устанавливаются пакеры, через которые в трещину подается инъецирующий раствор. Проиллюстрированы фотографии установки пакера в ограждающую конструкцию здания (рисунок 2.3).

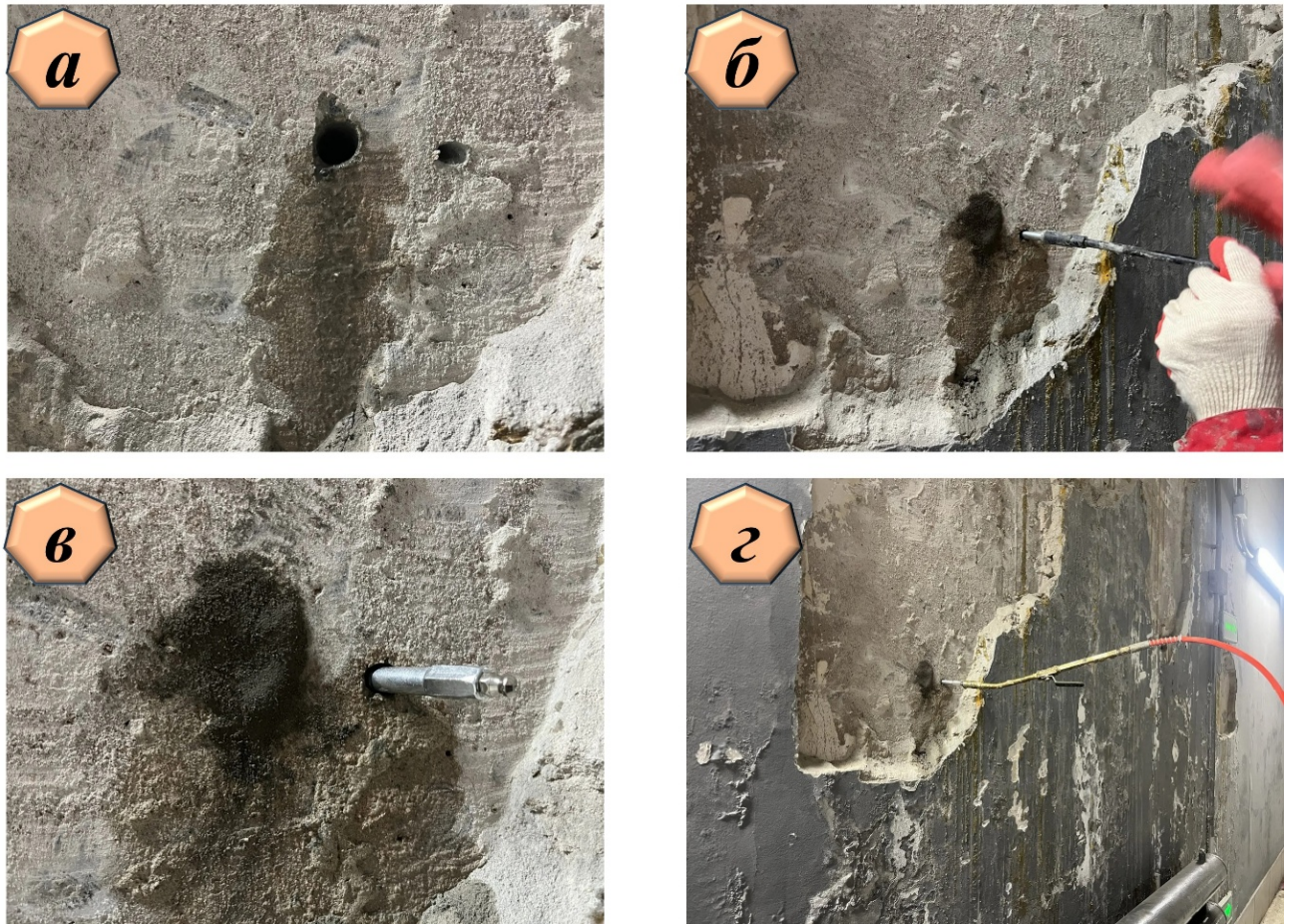


Рисунок 2.3. Фотографии установки пакера в ограждающую конструкцию здания (а – отверстие в стене здания под пакер; б – установка пакера в стену здания; в – пакер, установленный в стену здания; г – подача инъекционного раствора).

Как трещины, так и пакеры нарушают однородность ограждающей конструкции здания, так как влияют на температурное поле узла здания, в котором находятся. Было предложено оценить влияние трещин и установленных в них пакеров в кирпичных, пенобетонных и железобетонных стенах на изменение удельных потерь теплоты через ограждающую конструкцию здания.

2.2. Математическая модель теплопроводности для моделирования температурного поля стены здания с трещиной, заполненной инъекционным раствором, в двухмерной постановке

Для математического моделирования температурного поля трещины стены здания использовано дифференциальное уравнение стационарной теплопроводности в двухмерной постановке:

$$\lambda \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right) = 0. \quad (2.1)$$

где λ – теплопроводность, Вт/(м·°С); t – температура, °С; x и y – координаты, м.

Проиллюстрирована схема отремонтированного узла стены здания с указанием пространственной области решения и граничных условий (рисунок 2.4).

На рисунке 2.4 по оси абсцисс отложена пространственная координата x , по оси ординат – пространственная координата y .

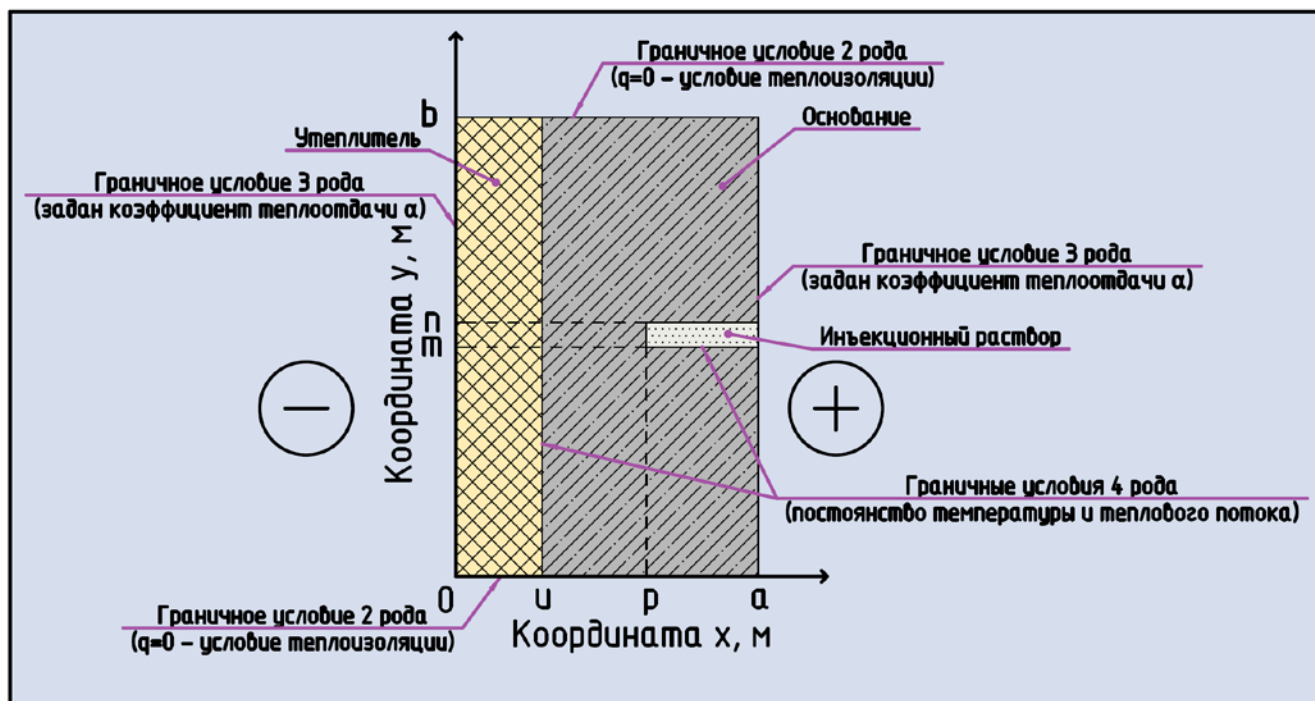


Рисунок 2.4. Схема отремонтированного узла стены здания с указанием пространственной области решения и граничных условий.

Пространственная область решения Ω для рассматриваемого узла стены здания определена по оси координат x на интервале от $x=0$ до $x=a$, по оси координат y на интервале от $y=0$ до $y=b$:

$$\Omega = \{x, y: 0 \leq x \leq a, 0 \leq y \leq b\}. \quad (2.2)$$

где Ω – пространственная область решения для рассматриваемого узла; a – координата на оси x , определяющая наиболее удаленную точку пространственной области решения от начала координат, м; b – координата на оси y , определяющая наиболее удаленную точку пространственной области решения от начала координат, м.

При этом утеплитель находится в области $0 \leq x \leq u, 0 \leq y \leq b$; инъекционный раствор находится в области $p \leq x \leq a, m \leq y \leq n$, основание конструкции лежит в трех областях $u \leq x \leq a, 0 \leq y \leq m, u \leq x \leq p, m \leq y \leq n$ и $u \leq x \leq a, n \leq y \leq b$. Значения u, p, a по оси x и значения m, n, b по оси y указаны на рисунке 2.4.

На левой и правой границах узла стены задается граничное условие третьего рода:

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha_n (t_n - t_{n.нов}). \quad (2.3)$$

$$\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=a} = \alpha_e (t_e - t_{e.нов}). \quad (2.4)$$

где

α_n – коэффициент теплоотдачи между наружной поверхностью и наружным воздухом, Вт/(м²·°C);

α_e – коэффициент теплоотдачи между наружной поверхностью и наружным воздухом, (м²·°C)/Вт;

$t_{n.нов}$ – температура наружной поверхности стены, °C;

$t_{e.нов}$ – температура внутренней поверхности стены, °C;

Температура наружного воздуха задается -23 °C, внутреннего – 20 °C. Величина α_e принимается равной 8,7 (м²·°C)/Вт; величина α_n принимается равной

23 (м²·°C)/Вт. На нижней и на верхней границах рассматриваемого узла стены здания применяются граничные условия второго рода, задающие условия теплоизоляции:

$$\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0. \quad (2.5)$$

$$\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \Big|_{y=b} = 0. \quad (2.6)$$

Между различными материалами рассматриваемого узла задаются граничные условия 4 рода, характеризующие равенство температуры и теплового потока на стыке слоев.

Для стыка утеплителя и основания справедливо равенство:

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=u-0} = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=u+0}. \quad (2.7)$$

Для стыка основания и инъекционного раствора можно записать:

$$\left\{ \begin{array}{l} -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=p-0} = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=p+0} \quad - \text{ для } m \leq y \leq n \\ -\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \Big|_{y=m-0} = -\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \Big|_{y=m+0} \quad - \text{ для } p \leq x \leq a . \\ -\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \Big|_{y=n-0} = -\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \Big|_{y=n+0} \quad - \text{ для } p \leq x \leq a \end{array} \right. \quad (2.8)$$

Решение дифференциального уравнения теплопроводности осуществляется методом конечных элементов.

2.3. Математическое моделирование температурных полей стен зданий с трещинами, заполненными инъекционным раствором

Было проведено математическое моделирование температурного поля стен зданий с трещинами. В качестве материала основания стен здания использовались пенобетон, железобетон и кирпич.

Расчеты проводились для 3 вариантов однослойных стен здания с трещинами, заполненными инъекционным раствором. Представлены варианты однослойных стен здания, принятых для расчета (таблица 2.2).

Таблица 2.2. Варианты однослойных стен здания принятых для расчета

№	Материал основания стены здания	Толщина основания конструкции, м	Количество конструкций, шт
1	Пенобетон	0,2	3
2	Кирпич	0,38	
3	Железобетон	0,3	

Также были рассчитаны эти же 3 варианта стен здания с трещинами, заполненными инъекционным раствором, но утепленные плитами из минеральной ваты.

Таким образом, расчетное исследование производилось для 6 узлов стен здания (для 3 неутепленных ограждающих конструкций и 3 утепленных).

Теплопроводность материалов принималась по официально действующему нормативному документу СП [80].

Математическое моделирование температурных полей стен зданий с трещинами производилось в программном комплексе Ansys Workbench.

При математическом моделировании утепленных узлов стен зданий с трещинами принималось, что стена утеплена утеплителем толщиной 0,1 м из минеральной ваты.

Представлены результаты математического моделирования температурного поля стен зданий из пенобетона толщиной 0,2 м со сквозной трещиной, заполненной инъекционным раствором, при ширине раскрытия трещины 10 мм в варианте без утеплителя (рисунок 2.5а) и с утеплителем (рисунок 2.5б).

Из рисунка 2.5 видно, что инъекционный раствор искажает поле температуры.

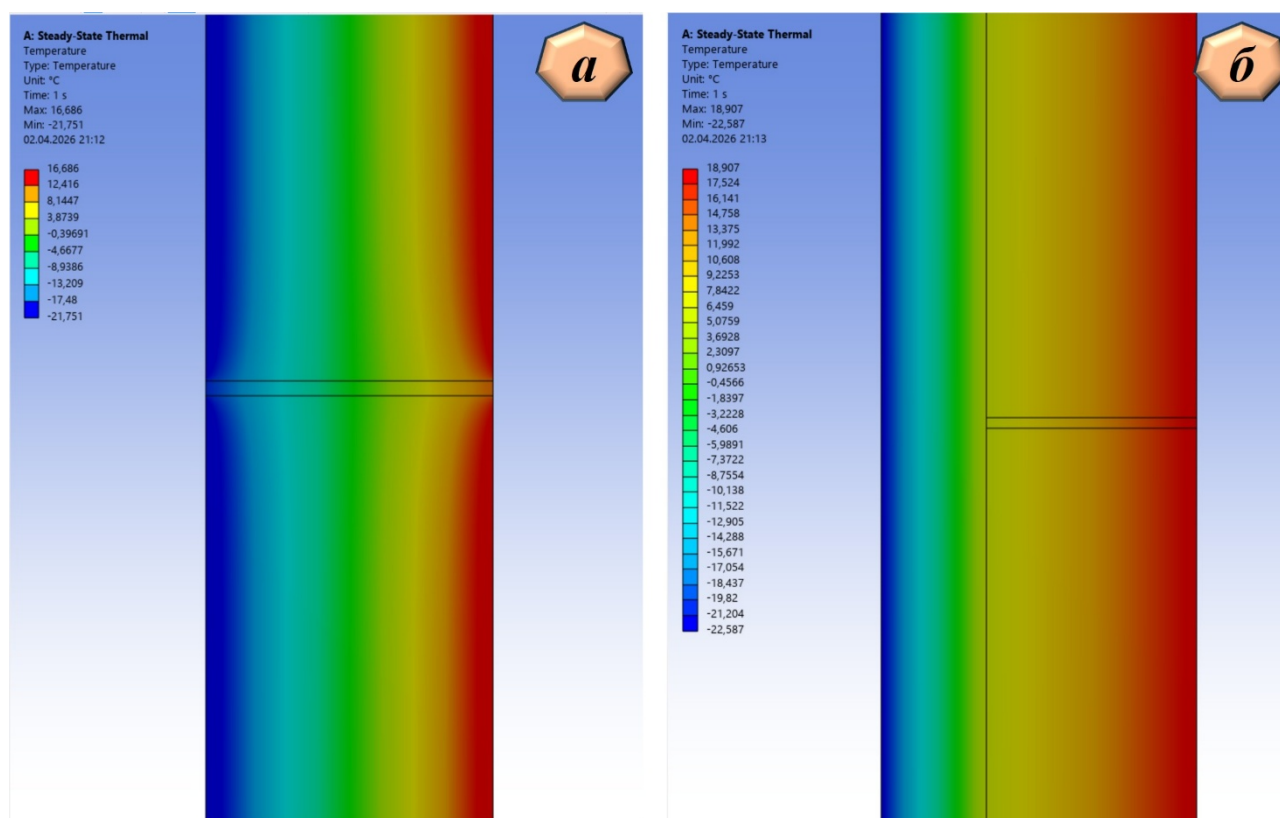


Рисунок 2.5. Результаты математического моделирования температурного поля стен зданий из пенобетона толщиной 0,2 м со сквозной трещиной, заполненной инъекционным раствором, при ширине раскрытия трещины 10 мм в варианте (а – однослойная стена здания без утеплителя; б – стена, утепленная 0,1 м минеральной ваты).

Рисунок иллюстрирует нарушение равномерности поля температуры вблизи трещины. Наибольшее искажение изотерм наблюдается у наружной и внутренней поверхностей рассматриваемой конструкции. Стоит отметить, что инъекционный раствор выступает мостиком холода в пенобетоне.

Искажение температурного визуально больше проявляется в случае стены без утеплителя (рисунок 2.5а) в сравнении со стеной с утеплителем (рисунок 2.5б). Это объясняется тем, что общий тепловой поток через стену снижается и влияние трещины поток теплоты через рассматриваемый узел тоже снижается.

Для оценки изменения линейной плотности теплового потока, вызванное инъекционным раствором в трещине стены здания, определялась по результатам

математического моделирования линейная плотность теплового потока для стены здания без трещины $q_{\text{без трещины}}^L$, затем линейная плотность теплового потока стены с трещиной, заполненной инъекционным раствором $q_{\text{с трещиной}}^L$.

Удельные потери теплоты через трещину стены здания, заполненную инъекционным раствором, вычислялись по формуле:

$$\psi_{\text{трещины}} = \frac{q_{\text{с трещиной}}^L - q_{\text{без трещины}}^L}{\Delta t}. \quad (2.9)$$

где

$\psi_{\text{трещины}}$ – удельные потери теплоты через трещину стены здания, заполненную инъекционным раствором, Вт/(м·°C);

$q_{\text{с трещиной}}^L$ – линейная плотность теплового потока, проходящая через рассчитываемый фрагмент стены здания с трещиной, заполненной инъекционным раствором, Вт/м;

$q_{\text{без трещины}}^L$ – линейная плотность теплового потока, проходящая через рассчитываемый фрагмент стены здания без трещины, Вт/м;

Δt – разность температур по разные стороны рассчитываемого фрагмента стены здания, °C.

Представлены значения линейной плотности теплового потока для стены здания из блоков из пенобетона толщиной 0,2 м (таблица 2.3).

Из таблицы 2.3 видно, что линейная плотность теплового потока в неутепленной стене из блоков из пенобетона без трещины составляет 28,83 Вт/м. Введение в рассматриваемый узел трещины с инъекционным раствором увеличивает линейную плотность теплового потока до 32,87 Вт/м.

Увеличение линейной плотности теплового потока, обусловленного трещиной, составляет 0,6 Вт/м (5,3 %). Удельные потери теплоты через трещину, заполненную инъекционным раствором, составляют 0,014 Вт/(м·°C).

Таблица 2.3. Значения линейной плотности теплового потока для стены здания из блоков из пенобетона толщиной 0,2 м

Ограждающая конструкция	Линейная плотность теплового потока в стене без трещины $q_{\text{без трещины}}^L$, Вт/м	Линейная плотность теплового потока в стене с трещиной, заполненной инъекционным раствором, $q_{\text{с трещиной}}^L$, Вт/м	Удельные потери теплоты через трещину, заполненную инъекционным раствором, $\psi_{\text{трещины}}$, Вт/(м·°C)
Однослойная стена здания из пенобетона толщиной 0,2 м без утеплителя	28,83	32,87	0,094
Стена здания из пенобетона толщиной 0,2 м, утепленная плитами из минеральной ваты толщиной 100 мм	10,77	11,37	0,014

Представлено сравнение удельных потерь теплоты через трещину, заполненную инъекционным раствором, для стены здания из блоков из пенобетона толщиной 0,2 м со сквозной трещиной с шириной раскрытия 10 мм для утепленного и неутепленного вариантов стены (рисунок 2.6).

Из рисунка 2.6 можно сделать вывод, что влияние трещины на удельные потери теплоты через утепленную конструкцию из блоков из пенобетона ниже, чем на удельные потери теплоты через неутепленную конструкцию.

Удельные потери теплоты через трещину для случая неутепленной конструкции ($\psi_{\text{трещины}} = 0,094$ Вт/м) из блоков из пенобетона в 6,71 раз выше, чем для утепленного варианта ($\psi_{\text{трещины}} = 0,014$ Вт/м) этой же конструкции.

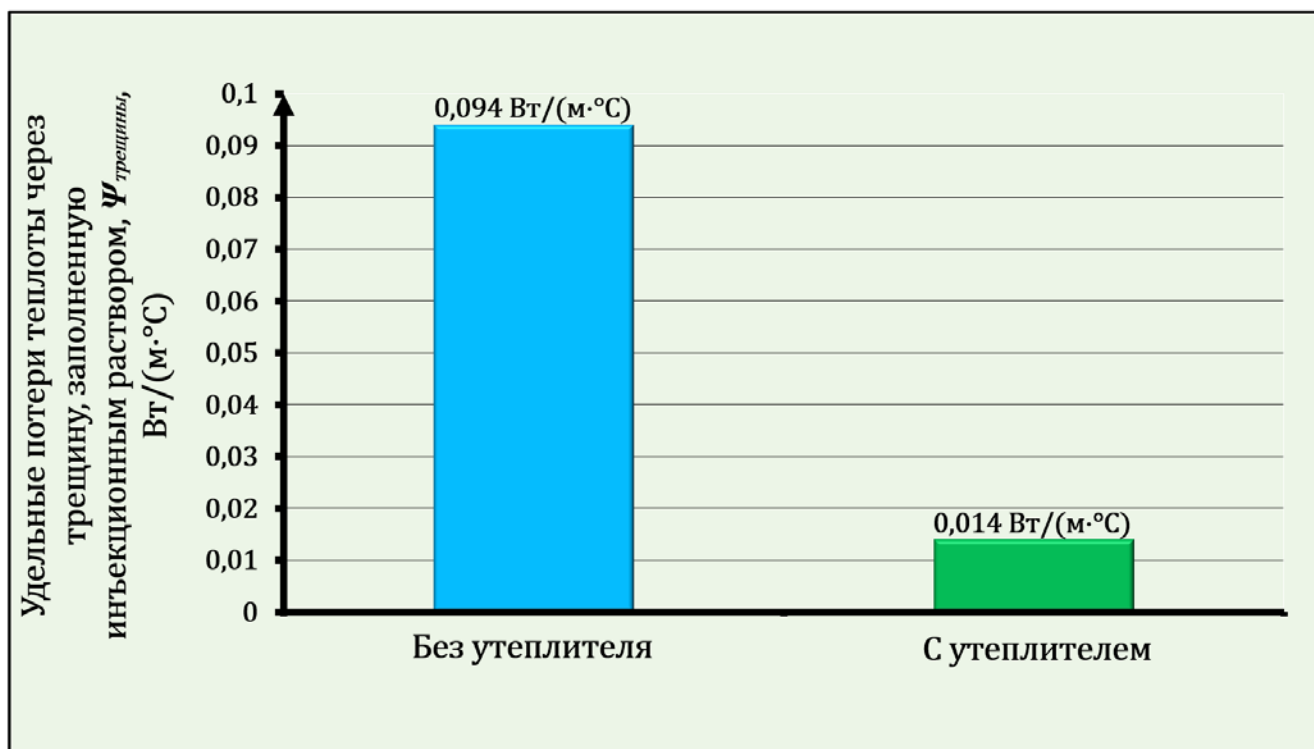


Рисунок 2.6. Сравнение удельных потерь теплоты через трещину, заполненную инъекционным раствором, $\Psi_{\text{трещины}}$ для стены здания из блоков из пенобетона толщиной 0,2 м со сквозной трещиной с шириной раскрытия 10 мм для утепленного и неутепленного варианта стены.

Представлены значения линейной плотности теплового потока для стены здания из блоков из кладки из кирпича толщиной 0,38 м (таблица 2.4).

Получено, что введение в рассматриваемый узел трещины с инъекционным раствором увеличивает линейную плотность теплового потока до 70,67 $\text{Вт}/\text{м}$.

Таким образом, увеличение линейной плотности теплового потока, обусловленного трещиной, составляет 2,15 $\text{Вт}/\text{м}$ (3,04 %). Оценка удельных потерь теплоты по формуле (2.9) дает значение 0,05 $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$.

Увеличение линейной плотности теплового потока, обусловленного трещиной, составляет 0,22 $\text{Вт}/\text{м}$ (1,6 %). Удельные потери теплоты через трещину, заполненную инъекционным раствором, составляют 0,005 $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$.

Таблица 2.4. Значения линейной плотности теплового потока для стены здания из блоков из кладки из кирпича толщиной 0,38 м

Ограждающая конструкция	Линейная плотность теплового потока в стене без трещины $q_{\text{без трещины}}^L$, Вт/м	Линейная плотность теплового потока в стене с трещиной, заполненной инъекционным раствором, $q_{\text{с трещиной}}^L$, Вт/м	Удельные потери теплоты через трещину, заполненную инъекционным раствором, $\psi_{\text{трещины}}$, Вт/(м·°С)
Однослойная стена здания из кирпича толщиной 0,38 м	68,52	70,67	0,05
Стена здания из кирпича толщиной 0,38 м, утепленная плитами из минеральной ваты толщиной 0,1 м	13,75	13,97	0,005

Представлено сравнение удельных потерь теплоты через трещину, заполненную инъекционным раствором, для стены здания из кладки из кирпича толщиной 0,38 м со сквозной трещиной с шириной раскрытия 10 мм для утепленного и неутепленного вариантов стены (рисунок 2.7).

Из рисунка 2.7 можно сделать вывод, что влияние трещины на удельные потери теплоты через утепленную конструкцию из кладки из кирпича ниже, чем на удельные потери теплоты через неутепленную конструкцию.

Для стены с трещиной уменьшение линейной плотности теплового потока, обусловленного трещиной, составляет 0,09 Вт/м (0,6 %). Удельные потери теплоты через трещину, заполненную инъекционным раствором, составляют –0,002 Вт/(м·°С).

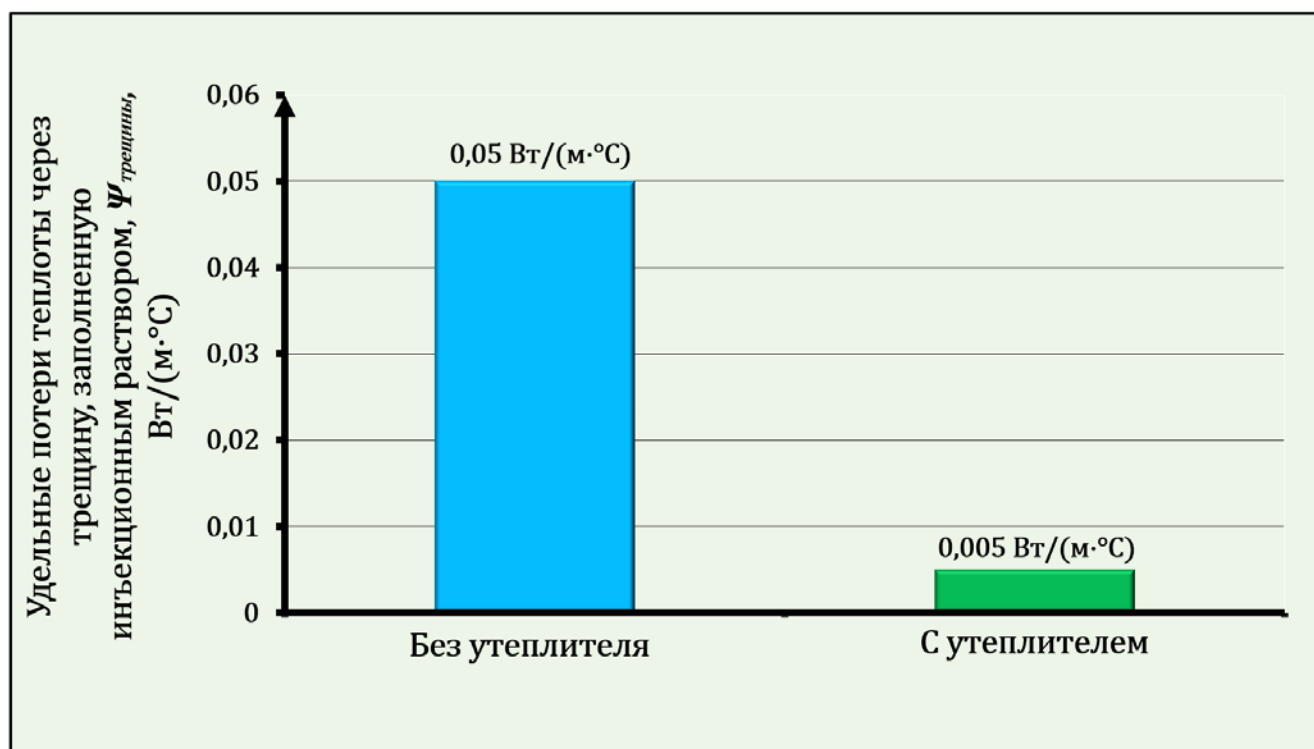


Рисунок 2.7. Сравнение удельных потерь теплоты через трещину, заполненную инъекционным раствором, $\Psi_{\text{трещины}}$ для стены здания из кладки из кирпича толщиной 0,38 м со сквозной трещиной с шириной раскрытия 10 мм для утепленного и неутепленного варианта стены.

Представлены значения линейной плотности теплового потока для стены здания из железобетона толщиной 0,3 м в вариантах без трещины и со сквозной трещиной, заполненной инъекционным раствором, при ширине раскрытия трещины 10 мм, а также удельные потери теплоты через трещину стены здания (таблица 2.5).

Из таблицы 2.5 видно, что линейная плотность теплового потока в неутепленной стене из железобетона без трещины составляет 140,76 Вт/м. Введение в рассматриваемый узел трещины с инъекционным раствором уменьшает линейную плотность теплового потока до 139,04 Вт/м.

Таблица 2.5. Значения линейной плотности теплового потока для утепленной и неутепленной стены здания из железобетона толщиной 0,3 м в вариантах без трещины $q_{\text{без трещины}}^L$ и со сквозной трещиной, заполненной инъекционным раствором, $q_{\text{трещиной}}^L$ при ширине раскрытия трещины 10 мм, а также удельные потери теплоты через трещину стены здания $\psi_{\text{трещины}}$

Ограждающая конструкция	Линейная плотность теплового потока в стене без трещины $q_{\text{без трещины}}^L$, Вт/м	Линейная плотность теплового потока в стене с трещиной, заполненной инъекционным раствором, $q_{\text{трещиной}}^L$, Вт/м	Удельные потери теплоты через трещину, заполненную инъекционным раствором, $\psi_{\text{трещины}}$, Вт/(м·°C)
Однослойная стена из железобетона толщиной 0,3 м	140,76	139,04	-0,04
Стена из железобетона толщиной 0,3 м, утепленная плитами из минеральной ваты толщиной 0,1 м	15,33	15,24	-0,002

Представлено сравнение удельных потерь теплоты через трещину, заполненную инъекционным раствором, $\psi_{\text{трещины}}$ для стены здания из железобетона толщиной 0,3 м со сквозной трещиной с шириной раскрытия 10 мм для утепленного и неутепленного вариантов стены (рисунок 2.8).

Из рисунка 2.8 можно сделать вывод, что влияние трещины на удельные потери теплоты через утепленную конструкцию из железобетона ниже, чем через неутепленную конструкцию.

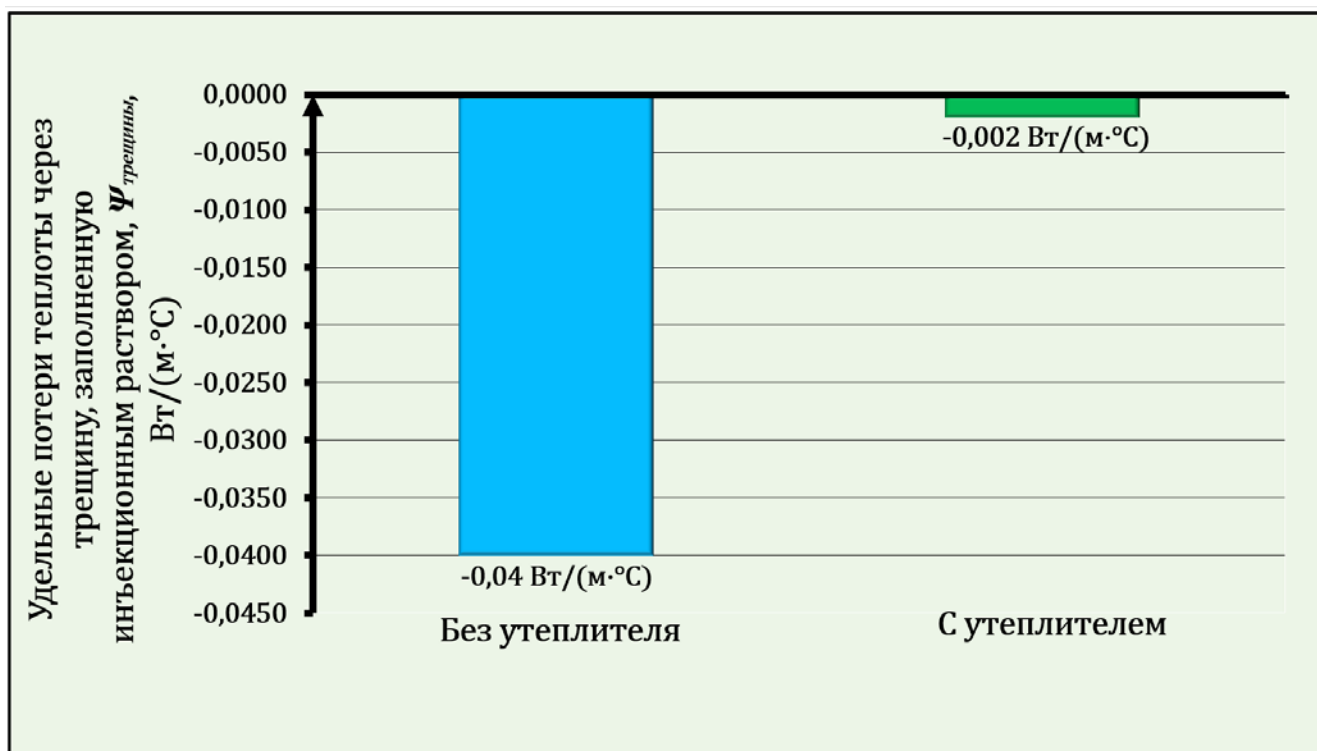


Рисунок 2.8. Сравнение удельных потерь теплоты через трещину, заполненную инъекционным раствором, $\Psi_{\text{трещины}}$ для стены здания из железобетона толщиной 0,3 м со сквозной трещиной с шириной раскрытия 10 мм для утепленного и неутепленного варианта стены.

2.4. Разработка номограмм удельных потерь теплоты для трещин в стенах здания, заполненных инъекционным раствором, по результатам математического моделирования температурных полей

Размеры трещины влияют на потери теплоты. Для систематизации результатов математического моделирования и возможности их последующего применения в проектировании зданий и сооружений результаты расчетов были сведены в номограммы удельных потоков теплоты через трещины стен здания, заполненные инъекционным раствором. Номограммы разрабатывались для стен зданий, приведенных в таблице 2.2, при различных вариантах ширины раскрытия и глубины трещины.

Ширина раскрытия трещины принималась от 0,5 мм до 10 мм (рассчитывались значения 0,5 мм, 1 мм, 5 мм, 10 мм).

Глубина трещины задавалась от 1 мм до полной толщины конструкции (рассчитывались значения 1 мм, 5 мм, 10 мм, 50 мм). После расчета трещины глубиной 50 мм, последующие глубины трещины брались с шагом 50 мм до полной толщины конструкции. Например, для кирпичной кладки толщиной 380 мм моделирование производилось при следующих глубинах трещины: 1 мм, 5 мм, 10 мм, 50 мм, 100 мм, 150 мм, 200 мм, 250 мм, 300 мм, 350 мм, 380 мм.

Предложен алгоритм построения номограммы удельных потоков теплоты через трещины в стенах зданий, заполненные инъекционным раствором:

1. Выбирается материал основания ограждающей конструкции стены здания и материал утеплителя (для случая утепленного узла).
2. Строится геометрическая модель стены здания без трещины.
3. Для выбранной стены здания производится построение температурного поля. По результатам математического моделирования определяется линейная плотность теплового потока, проходящая через рассчитываемый фрагмент стены здания без трещины $q_{\text{без трещины}}^L$.
4. В геометрическую модель стены здания добавляется трещина, заполненная инъекционным раствором. При этом ширина раскрытия трещины устанавливается в 0,5 мм, а глубина трещины принимается 1 мм.
5. Для выбранного узла производятся построение температурного поля. По результатам математического моделирования определяется линейная плотность теплового потока, проходящая через рассчитываемый фрагмент стены здания с трещиной, заполненной инъекционным раствором, $q_{\text{с трещиной}}^L$.
6. Вычисляются удельные потери теплоты через трещину, заполненную инъекционным раствором, по формуле (2.9).
7. Затем глубина трещины увеличивается. Глубина последовательно принимается 5 мм, 10 мм, 50 мм, последующие глубины трещины берутся с шагом 50 мм до полной толщины конструкции. Для каждого случая повторяется моделирование и расчеты, описанные в пунктах 5 и 6.

8. Затем ширина раскрытия трещины увеличивается. Ширина раскрытия последовательно принимается 1 мм, 5 мм, 10 мм. Для каждого случая повторяется моделирование и расчеты, описанные в пунктах 5, 6 и 7.

9. Результаты расчетов представляются в виде номограммы удельных потоков теплоты через стену здания с трещиной, заполненной инъекционным раствором.

Произведено построение номограмм удельных потоков теплоты для стен зданий с трещинами, заполненных инъекционным раствором, для конструкций, приведенных в таблице 2.2, при различных вариантах ширины раскрытия и глубины трещины в вариантах с утеплителем и без утеплителя.

Представлены номограммы для определения удельных потерь теплоты через трещины в стенах здания, заполненные инъекционным раствором (рисунок 2.9).

На оси абсцисс номограмм для определения удельных потерь теплоты через трещины в стенах здания, заполненные инъекционным раствором (рисунок 2.9) отложена ширина раскрытия трещины, по оси ординат – удельные потери теплоты через трещину, цифры от 1 до 11 иллюстрируют варианты глубины трещины от 1 мм до 380 мм соответственно. Разработанные номограммы позволяют определять величину удельных потерь теплоты через различные стены здания, выполненные из разных материалов, при разных геометрических размерах трещины упрощенно графически без построения температурных полей.

Из рисунка 2.9 видно, что наибольшее увеличение линейной плотности теплового потока из-за влияния трещины, заполненной инъекционным раствором, наблюдается в стенах из блоков из пенобетона. Меньшее увеличение линейной плотности теплового потока происходит в стенах из кирпичной кладки. В стенах из железобетона, наоборот, инъекционный раствор снижает тепловой поток. В связи с этим значения удельных потоков теплоты на номограммах для стен из железобетона получились отрицательными.

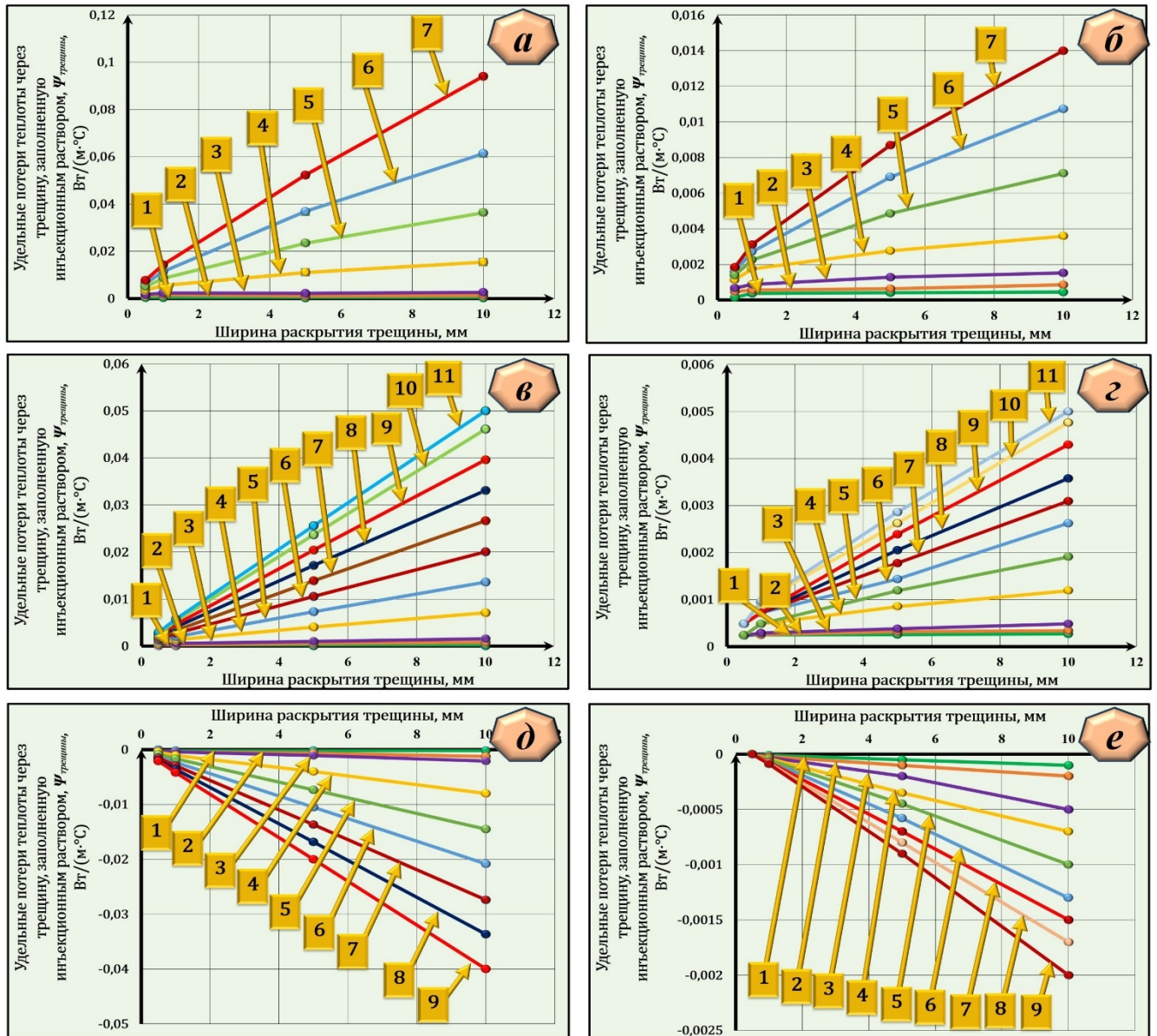


Рисунок 2.9. Номограммы для определения удельных потерь теплоты через трещины в стенах здания, заполненные инъекционным раствором, $\Psi_{\text{трещины}}$ (а – пенобетон толщиной 0,2 м; б – пенобетон толщиной 0,2 м с утеплителем толщиной 0,1 м; в – кирпич толщиной 0,38 м; г – кирпич толщиной 0,38 м с утеплителем толщиной 0,1 м; д – железобетон толщиной 0,3 м; е – железобетон толщиной 0,3 м с утеплителем толщиной 0,1 м; цифрами обозначены варианты глубины трещины: 1 – 1 мм; 2 – 5 мм; 3 – 10 мм; 4 – 50 мм; 5 – 100 мм; 6 – 150 мм; 7 – 200 мм; 8 – 250; 9 – 300 мм; 10 – 350 мм; 11 – 380 мм).

Получено, что для всех исследованных оснований стен зданий при утеплении удельные потери теплоты снижаются и влияние инъекционного раствора в трещине стены здания на общий тепловой поток через узел тоже уменьшается.

2.5. Алгоритм использования номограмм удельных потерь теплоты через трещины в стенах зданий, заполненные инъекционным раствором

Для использования номограмм в практических инженерных расчетах необходимо графически определить удельные потери теплоты через трещину в стене здания, заполненную инъекционным раствором, по значениям глубины трещины и ширины раскрытия трещины.

Предложен алгоритм использования номограммы удельных потерь теплоты через трещины в стенах зданий, заполненные инъекционным раствором:

1. Определяется глубина $d_{\text{гл}}$ и ширина раскрытия трещины $d_{\text{рас}}$.
2. Выбирается номограмма удельных потерь теплоты через трещину стены здания, заполненную инъекционным раствором, соответствующая рассматриваемому случаю.
3. На оси абсцисс номограммы откладывается значение ширины раскрытия трещины $d_{\text{рас}}$.
4. Из данной точки проводится прямая перпендикулярная оси абсцисс до пересечения с линией, определяющей глубину трещины $d_{\text{гл}}$. Для случая, когда нужная линия глубины трещины отсутствует, необходимо с помощью интерполяции провести линию до точки номограммы, соответствующей искомой глубине трещины $d_{\text{гл}}$.
5. Из определенной в пункте 4 точки необходимо провести вторую прямую, перпендикулярную оси ординат, до пересечения с осью ординат. По значению на оси ординат определяются удельные потери теплоты через трещину в стене здания $\psi_{\text{трещины}}$.

6. В случае, если в стене здания присутствуют несколько трещин с различной глубиной трещины $d_{гл}$ и шириной раскрытия трещины $d_{рас}$, то для каждого случая определяются свои значения удельных потерь теплоты через трещину в стене здания $\psi_{трещины}$.

2.6. Выводы по главе 2

Материалом исследования явились здания с трещинами. Проведено натурное обследование 23 зданий разного назначения в разных районах строительства с фотофиксацией трещин стен зданий.

С помощью математического моделирования проводилась оценка влияния трещин (с помощью величины $\psi_{трещины}$) в кирпичных, пенобетонных и железобетонных стенах на изменение удельных потерь теплоты. При этом предложено рассматривать трещину как линейную теплотехническую неоднородность и удельные теплоты через трещину определять с применением математического моделирования двухмерного температурного поля. Для решения дифференциального уравнения теплопроводности применялся метод конечных элементов. Для моделирования использован программный комплекс Ansys Workbench.

Получено по результатам математического моделирования, что инъекционный раствор, который вводится в трещину стены здания при ремонте, искажает поле температуры, нарушает равномерность изотерм вблизи трещины. При этом изменение теплового потока больше проявляется в случае стены без утеплителя в сравнении со стеной с утеплителем. Это обосновывается тем, что в случае неутепленной стены общий тепловой поток через рассчитываемый узел выше.

Рассчитано, что для стены здания из блоков из пенобетона толщиной 0,2 м внесение сквозной трещины при ширине раскрытия 10 мм увеличивает линейную плотность теплового потока с 28,83 Вт/м до 32,87 Вт/м. Удельные потери теплоты

составляют $0,094 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$. Для варианта данной стены, утепленной $0,1 \text{ м}$ минеральной ваты, внесение сквозной трещины при ширине раскрытия 10 мм увеличивает линейную плотность теплового потока с $10,77 \text{ Вт/м}$ до $11,37 \text{ Вт/м}$. Удельные потери теплоты составляют $0,014 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$.

Выявлено, что для стены здания из кладки из кирпича толщиной $0,38 \text{ м}$ внесение сквозной трещины при ширине раскрытия 10 мм увеличивает линейную плотность теплового потока с $68,52 \text{ Вт/м}$ до $70,67 \text{ Вт/м}$. Удельные потери теплоты составляют $0,05 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$.

Получено, что введение инъекционного раствора в трещину для стен из блоков из пенобетона или из кладки из кирпича увеличивает линейную плотность теплового потока, а введение инъекционного раствора в трещину для стены из железобетона, наоборот, снижает линейную плотность теплового потока. Это объясняется тем, что теплопроводность инъекционного раствора выше, чем теплопроводность пенобетона и кирпича, но ниже, чем теплопроводность железобетона.

Проведена разработка номограмм удельных потерь теплоты для трещин в стенах здания, заполненных инъекционным раствором, по результатам математического моделирования температурных полей. Номограммы позволяют определять удельные потоки теплоты через трещину по значению ширины раскрытия трещины и глубины трещины графически без построения температурного поля. При построении номограмм ширина раскрытия трещины принималась $0,5 \text{ мм}$, 1 мм , 5 мм , 10 мм . Глубина трещины задавалась от 1 мм до полной толщины конструкции. Разработан алгоритм построения номограмм удельных потоков теплоты через трещины в стенах зданий, заполненные инъекционным раствором.

Разработан алгоритм использования номограмм удельных потерь теплоты через трещины в стенах зданий, заполненные инъекционным раствором, который позволяет определить удельные потери теплоты через трещину по значениям глубины трещины и ширины раскрытия трещины.

ГЛАВА 3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ СТЕН ЗДАНИЙ С УСТАНОВЛЕННЫМИ В НИХ ПАКЕРАМИ

При ремонте трещины в ограждающей конструкции здания для заполнения ее инъекционным раствором применяют специальные устройства – пакеры. Пакеры устанавливаются в ограждающую конструкцию с определенным шагом в соответствии со схемой установки, предусмотренной проектом, и через пакеры в пустоты трещин подается инъекционный раствор. После выполнения ремонтных работ пакер опиливают и стальная трубка пакера, а также инъекционный раствор внутри неё остаются в стене. Таким образом, в конструкцию вносится дополнительный мостик холода, который изменяет тепловой поток через стену здания. Определению удельных потерь теплоты через пакеры, заполненные инъекционным раствором, посвящена настоящая глава.

3.1. Математическая модель теплопроводности для моделирования влияния пакеров на температурное поле стены здания в трехмерной постановке

Предложено пакеры, установленные в стене здания, рассматривать как точечные теплотехнические неоднородности.

Для математического моделирования температурного поля стены здания с установленным в ней пакером использовано дифференциальное уравнение стационарной теплопроводности в трехмерной постановке:

$$\lambda \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) = 0. \quad (3.1)$$

где z – координата, м.

Проиллюстрирована схема узла стены здания с установленным в ней пакером с указанием пространственной области решения и граничных условий (рисунок 3.1).

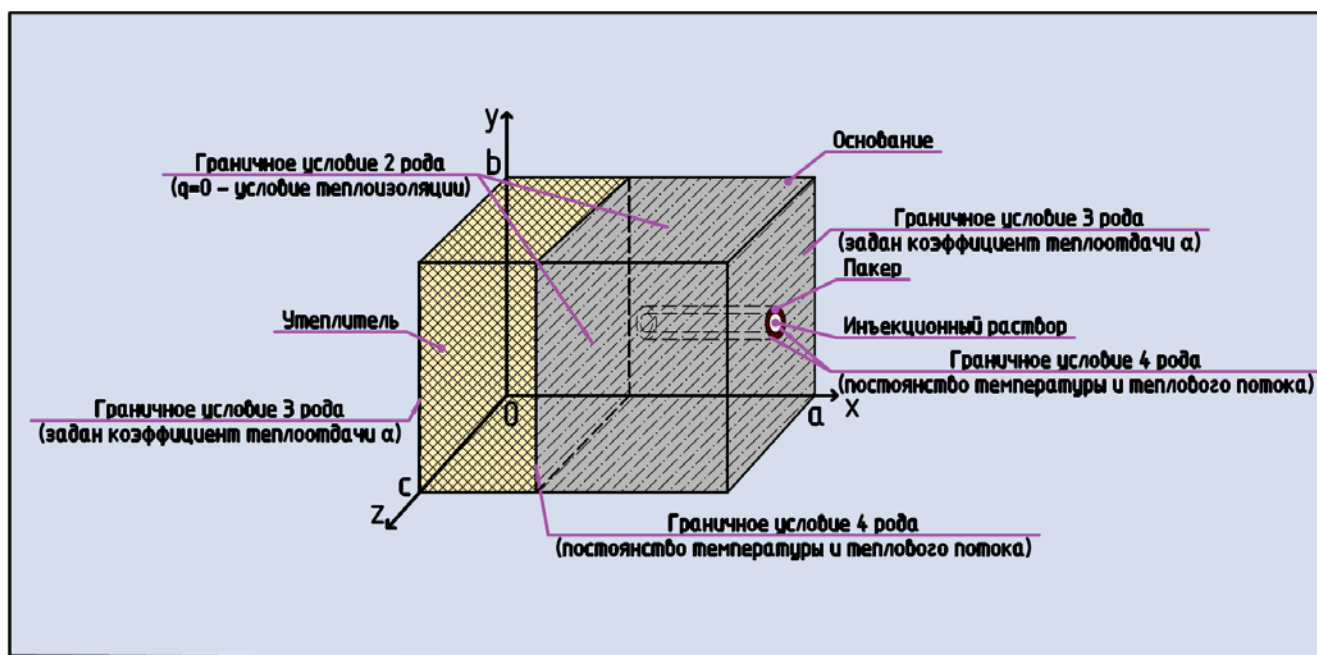


Рисунок 3.1. Схема узла стены здания с установленным в нем пакером с указанием пространственной области решения и граничных условий.

На рисунке 3.1 по оси абсцисс отложена пространственная координата x , по оси ординат – пространственная координата y , по оси аппликат – пространственная координата z .

Пространственная область решения Ω для рассматриваемого узла стены здания определена по оси координат x на интервале от $x=0$ до $x=a$, по оси координат y на интервале от $y=0$ до $y=b$, по оси координат z на интервале от $y=0$ до $y=c$:

$$\Omega = \{x, y, z: 0 \leq x \leq a, 0 \leq y \leq b, 0 \leq z \leq c\}. \quad (3.2)$$

где c – координата на оси z , определяющая наиболее удаленную точку пространственной области решения от начала координат, м.

На границах между стеной и воздухом задаются граничные условия третьего рода, описывающие теплообмен между воздухом и стеной. На остальных гранях стены используются граничные условия второго рода, задающие условия теплоизоляции. Между материалами различных слоев (между утеплителем и основанием, между пакером и стеной, между пакером и инъекционным раствором)

используются граничные условия четвертого рода, описывающие равенство температур и теплового потока в точках соприкосновения различных материалов.

Уравнения граничных условий аналогичны уравнениям (2.3) – (2.8) и соответствуют рисунку 3.1.

3.2. Математическое моделирование температурных полей стен зданий с установленными пакерами

Было проведено математическое моделирование температурного поля стен зданий с установленными в них пакерами. В качестве материала основания стен здания использовались пенобетон, железобетон и кирпич. Использовались пакеры диаметром 18 мм.

Расчеты проводились для 3 вариантов однослойных стен зданий с установленными в них пакерами, представленных в таблице 2.2. Также были рассчитаны эти же 3 варианта стен здания с пакерами, заполненными инъекционным раствором, но утепленные плитами из минеральной ваты толщиной 0,1 м. Таким образом, расчетное исследование производилось для 6 узлов стен зданий с установленными в них пакерами (для 3 неутепленных ограждающих конструкций и 3 утепленных).

Представлены результаты математического моделирования температурного поля для стен зданий из пенобетона толщиной 0,2 м с установленными пакерами на глубину 0,15 м в вариантах без утеплителя (рисунки 3.2а и 3.2в) и с утеплителем (рисунки 3.2б и 3.2г). Для большей наглядности из компьютерной модели после проведения расчетов была извлечена четверть узла по оси пакера. Расчет велся для всей модели (четверть узла была извлечена после проведения расчетов).

Из рисунка 3.2 видно, что пакер искажает поле температуры. Рисунок иллюстрирует нарушение равномерности поля температуры места установки пакера. Стоит отметить, что пакер, а также инъекционный раствор внутри пакера выступают мостиками холода в пенобетоне.

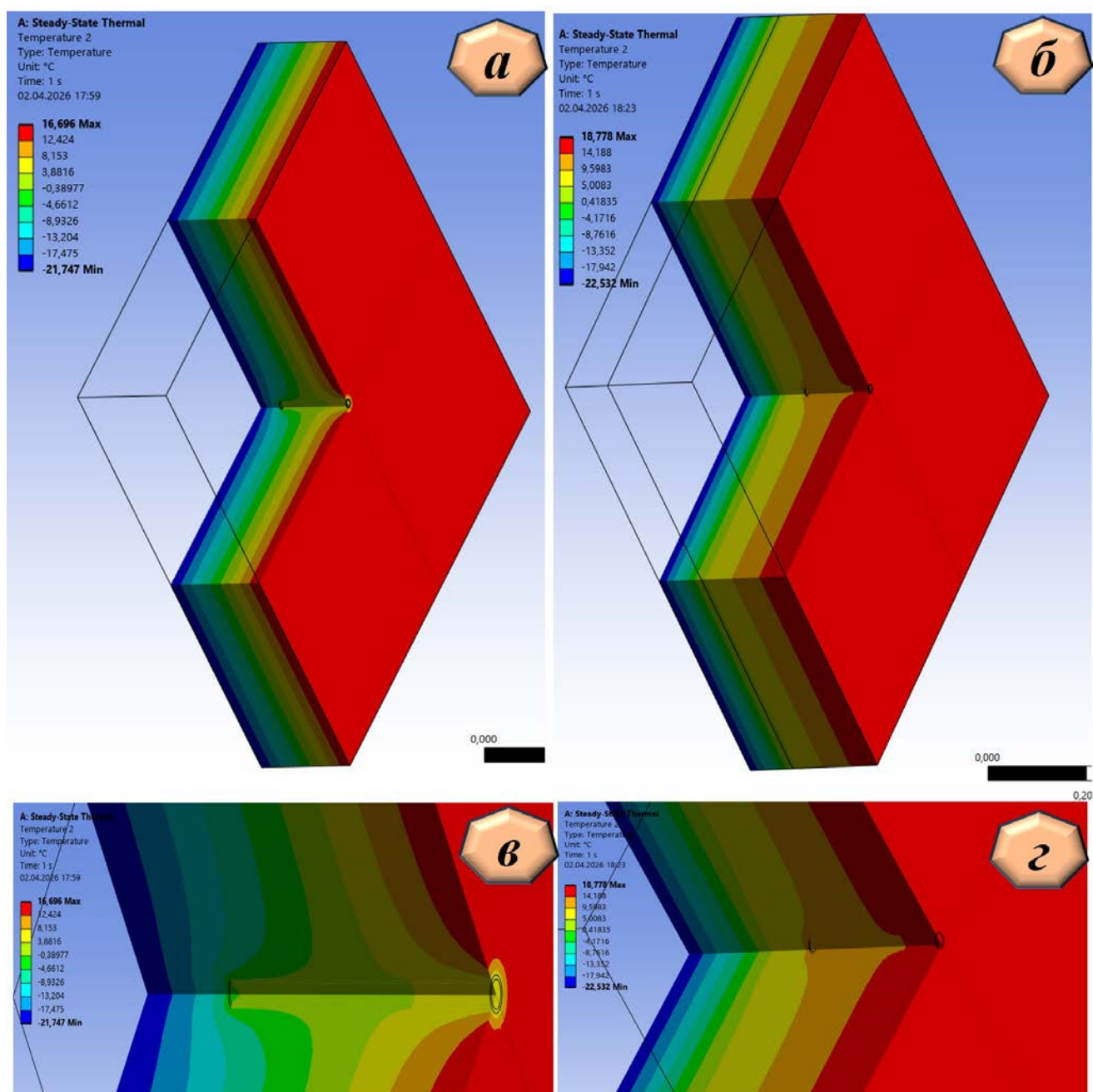


Рисунок 3.2. Результаты математического моделирования температурного поля для стен зданий из пенобетона толщиной 0,2 м с установленными пакерами на глубину 0,15 м. Для большей наглядности из компьютерной модели после проведения расчетов была извлечена четверть узла по оси пакера (*а* – однослойная стена здания без утеплителя с установленным пакером; *б* – стена здания, утепленная 0,1 м минеральной ваты; *в* – фрагмент модели однослойной стены здания без утеплителя с установленным пакером; *г* – фрагмент модели стены здания, утепленной 0,1 м минеральной ваты).

При этом пакер увеличивает теплопотери через узел из-за того, что теплопроводность пакера превышает теплопроводность пенобетона. Тепловой поток, проходящий через представленный на рисунке 3.2а узел, выше, чем тепловой поток, проходящий через этот же фрагмент стены без пакера. Аналогичная ситуация будет наблюдаться и для утепленного узла (рисунок 3.2б).

Для оценки изменения теплового потока, вызванного установкой пакера, определялся по результатам математического моделирования тепловой поток для стены здания без пакера $Q_{\text{без пакера}}$, затем тепловой поток стены с пакером, заполненным инъекционным раствором, $Q_{\text{с пакером}}$.

Удельные потери теплоты через пакер вычислялись по формуле:

$$\chi_{\text{пакера}} = \frac{Q_{\text{с пакером}} - Q_{\text{без пакера}}}{\Delta t}. \quad (3.3)$$

где

$\chi_{\text{пакера}}$ – удельные потери теплоты через пакер, установленный в стене, заполненный инъекционным раствором, Вт/°С;

$Q_{\text{с пакером}}$ – тепловой поток, проходящий через рассчитываемый фрагмент стены с установленным в нем пакером, заполненным инъекционным раствором, Вт;

$Q_{\text{без пакера}}$ – тепловой поток, проходящий через рассчитываемый фрагмент стены без пакера, Вт.

Представлены значения теплового потока для утепленной и неутепленной стены здания из блоков из пенобетона толщиной 0,2 м в вариантах без пакера и с пакером, заполненным инъекционным раствором, при глубине установки пакера 0,15 м, а также удельные потери теплоты через пакер, в стене здания, заполненный инъекционным раствором (таблица 3.1).

Таблица 3.1. Значения теплового потока для утепленной и неутепленной стены здания из блоков из пенобетона толщиной 0,2 м в вариантах без пакера и с пакером, заполненным инъекционным раствором, при глубине установки пакера 0,15 м, а также удельные потери теплоты через установленный в стене здания пакер, заполненный инъекционным раствором

Ограждающая конструкция	Тепловой поток через стену без пакера $Q_{\text{без пакера}}$, Вт	Тепловой поток через стену с установленным пакером $Q_{\text{с пакером}}$, Вт	Удельные потери теплоты через пакер $\chi_{\text{пакера}}$, Вт/°С
Однослойная стена здания из блоков из пенобетона толщиной 0,2 м без утеплителя	28,83	29,82	0,023
Стена здания из блоков из пенобетона толщиной 0,2 м, утепленная плитами из минеральной ваты толщиной 0,1 м	10,77	11,07	0,007

Из таблицы 3.1 видно, что тепловой поток в не утепленной стене из блоков из пенобетона без пакера составляет 28,83 Вт. Введение в рассматриваемый узел пакера с инъекционным раствором увеличивает тепловой поток до 29,82 Вт. Таким образом, увеличение теплового потока, обусловленного пакером, составляет 0,99 Вт (3,3 %). Оценка удельных потерь теплоты по формуле (2.12) дает значение 0,023 Вт/°С.

Для случая стены из блоков из пенобетона, утепленной минеральной ватой толщиной 0,1 м, тепловой поток через стену без пакера составляет 10,77 Вт, с пакером – 11,07 Вт.

Представлено сравнение удельных потерь теплоты через пакер, заполненный инъекционным раствором, для стены здания из блоков из пенобетона толщиной 0,2 м с установленным пакером при глубине установки пакера 0,15 м для утепленного и неутепленного вариантов стены (рисунок 3.3).

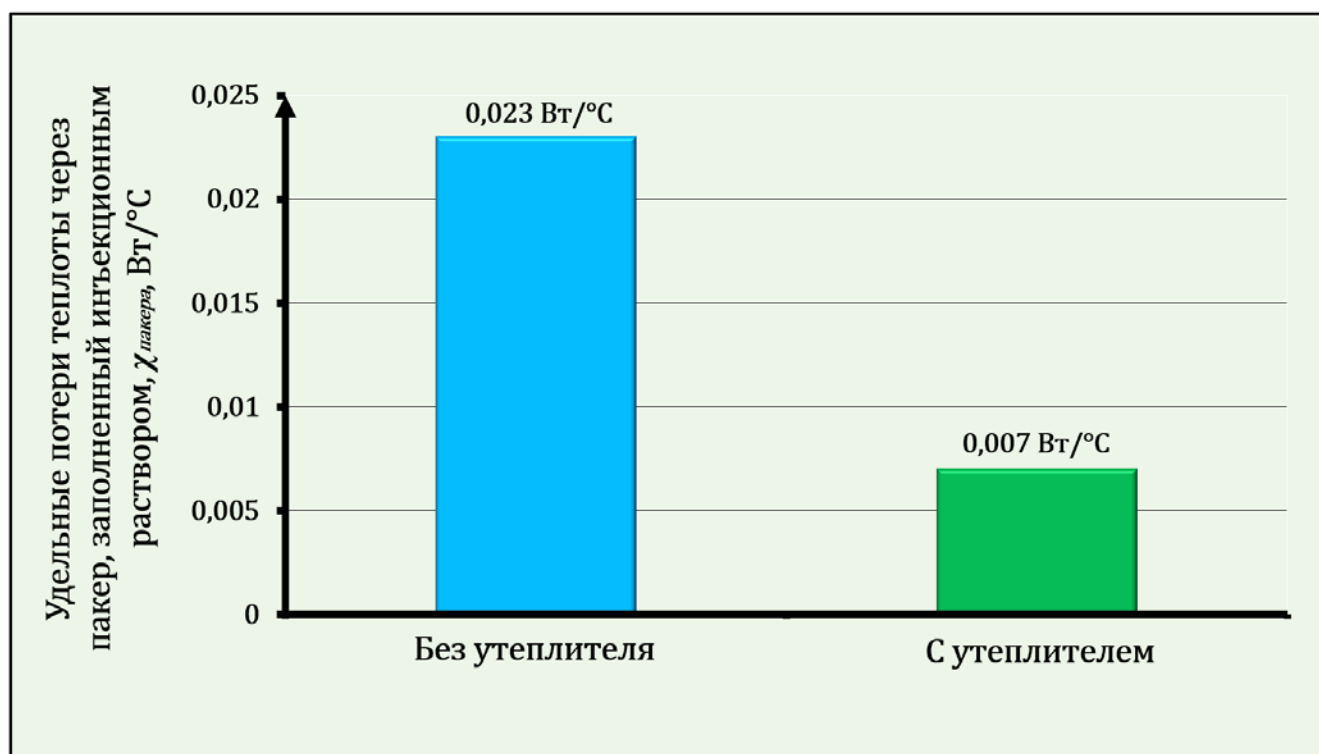


Рисунок 3.3. Сравнение удельных потерь теплоты через пакер для стены здания из пенобетона толщиной 0,2 м.

Из рисунка 3.3 можно сделать вывод, что влияние пакера на удельные потери теплоты через утепленную конструкцию из блоков из пенобетона ниже, чем на удельные потери теплоты через неутепленную конструкцию.

Представлены значения теплового потока для утепленной и неутепленной стены здания из кладки из кирпича толщиной 0,38 м в вариантах без пакера и с пакером, заполненным инъекционным раствором, при глубине установки пакера 0,3 м, а также удельные потери теплоты через пакер, в стене здания, заполненный инъекционным раствором (таблица 3.2).

Таблица 3.2. Значения теплового потока для утепленной и неутепленной стены здания из кладки из кирпича толщиной 0,38 м в вариантах без пакера и с пакером, заполненным инъекционным раствором, при глубине установки пакера 0,3 м, а также удельные потери теплоты через установленный в стене здания пакер, заполненный инъекционным раствором

Ограждающая конструкция	Тепловой поток через стену без пакера $Q_{\text{без пакера}}$, Вт	Тепловой поток через стену с установленным пакером, $Q_{\text{с пакером}}$, Вт	Удельные потери теплоты через пакер, $\chi_{\text{пакера}}$, Вт/°С
Однослойная стена здания из кладки из кирпича толщиной 0,38 м без утеплителя	68,52	69,34	0,019
Стена здания из кладки из кирпича толщиной 0,38 м, утепленная плитами из минеральной ваты толщиной 0,1 м	13,75	13,92	0,004

Из таблицы 3.2 видно, что тепловой поток в не утепленной стене из кладки из кирпича без пакера составляет 68,52 Вт. Введение в рассматриваемый узел пакера с инъекционным раствором увеличивает тепловой поток до 69,34 Вт. Таким образом, увеличение теплового потока, обусловленного пакером, составляет 0,82 Вт (1,2 %). Оценка удельных потерь теплоты по формуле (2.12) дает значение 0,019 Вт/°С.

Увеличение теплового потока, обусловленного пакером, составляет 0,17 Вт (1,2 %). Потери теплоты через пакер, заполненный инъекционным раствором, составляют 0,004 Вт/°С.

Представлено сравнение удельных потерь теплоты через пакер для стены здания из кирпича толщиной 0,38 м (рисунок 3.4).

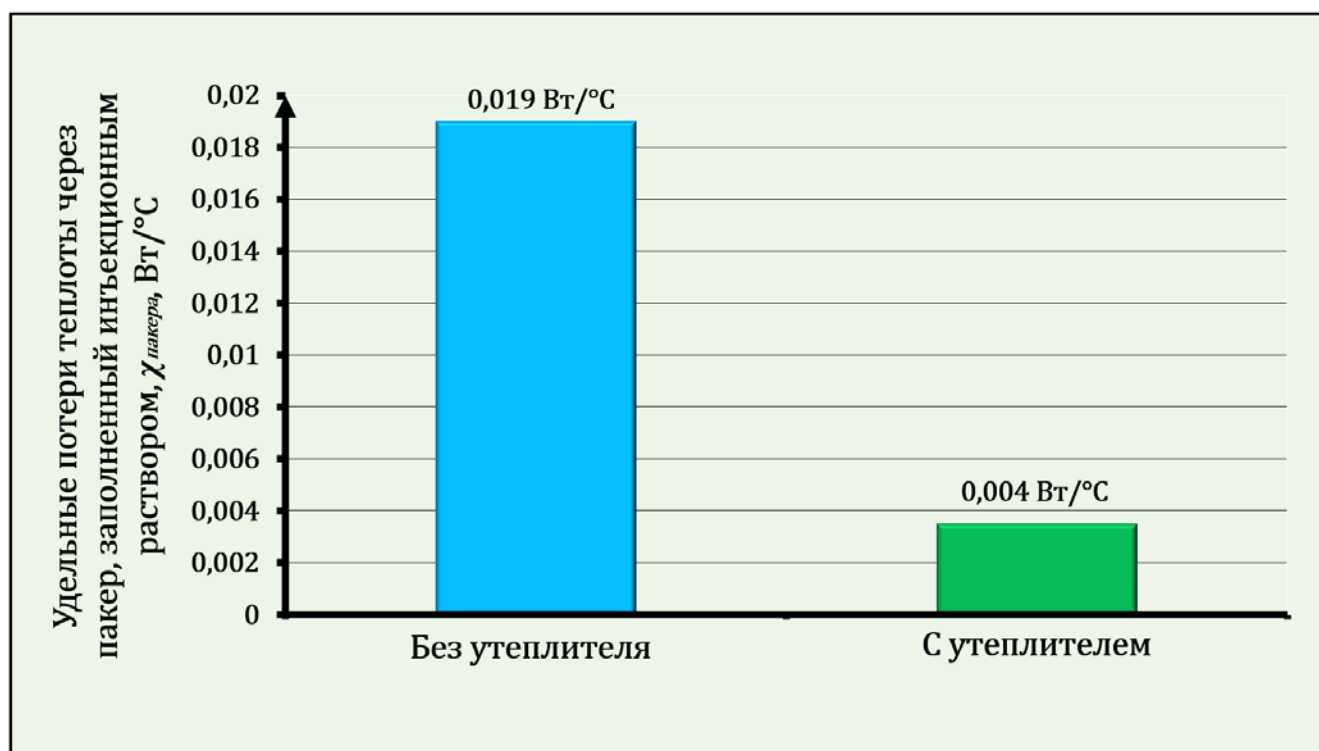


Рисунок 3.4. Сравнение удельных потерь теплоты через пакер для стены здания из кирпича толщиной 0,38 м.

Из рисунка 3.4 можно сделать вывод, что влияние пакера на удельные потери теплоты через утепленную конструкцию из ниже, чем через неутепленную.

Получено, что значения удельных потерь теплоты через пакер в стене из блоков из пенобетона выше (таблица 3.1, рисунок 3.3), чем в стене из кладки из кирпича (таблица 3.2, рисунок 3.4). Это объясняется тем, что теплопроводность кирпича выше теплопроводности пенобетона. Таким образом, можно сделать вывод, что пакер в стене из блоков из пенобетона сильнее снижает теплозащиту стены здания в сравнении с таким же пакером в стене из кладки из кирпича.

Представлены значения теплового потока для утепленной и неутепленной стены здания из железобетона толщиной 0,3 м в вариантах без пакера и с пакером, заполненным инъекционным раствором, при глубине установки пакера 0,25 м, а также удельные потери теплоты через пакер, в стене здания, заполненный инъекционным раствором (таблица 3.3).

Таблица 3.3. Значения теплового потока для утепленной и неутепленной стены здания из железобетона толщиной 0,3 м в вариантах без пакера и с пакером, заполненным инъекционным раствором, при глубине установки пакера 0,25 м, а также удельные потери теплоты через установленный в стене здания пакер, заполненный инъекционным раствором

Ограждающая конструкция	Тепловой поток через стену без пакера $Q_{\text{без пакера}}$, Вт	Тепловой поток через стену с установленным пакером, заполненным инъекционным раствором, $Q_{\text{с пакером}}$, Вт	Удельные потери теплоты через пакер, заполненный инъекционным раствором, $\chi_{\text{пакера}}$, Вт/°C
Железобетон толщиной 0,3	140,76	141,23	0,011
Железобетон толщиной 0,3 м утеплителем толщиной 0,1 м	15,33	15,42	0,002

Из таблицы 3.3 видно, что тепловой поток в не утепленной стене из железобетона без пакера составляет 140,76 Вт. Введение в рассматриваемый узел пакера с инъекционным раствором увеличивает тепловой поток до 141,23 Вт. Таким образом, увеличение теплового потока, обусловленного пакером, составляет 0,47 Вт (0,33 %). Оценка удельных потерь теплоты по формуле (2.12) дает значение 0,011 Вт/°C.

Для случая стены из железобетона, утепленной минеральной ватой толщиной 0,1 м, тепловой поток через стену без пакера составляет 15,33 Вт, с пакером – 15,42 Вт. Увеличение теплового потока, обусловленного пакером, составляет 0,09 Вт (0,58 %).

Представлено сравнение удельных потерь теплоты через пакер для стены здания из железобетона толщиной 0,3 м (рисунок 3.5).

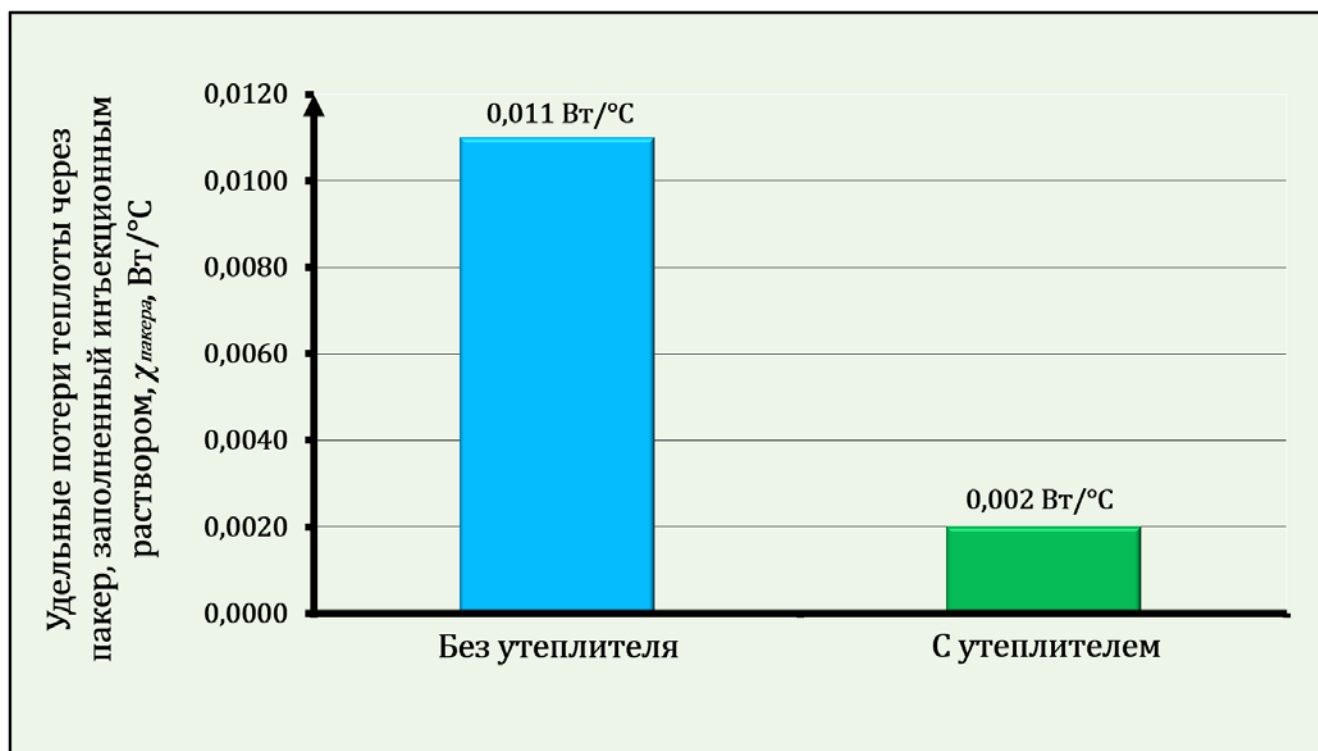


Рисунок 3.5. Сравнение удельных потерь теплоты через пакер для стены здания из железобетона толщиной 0,3 м.

Из рисунка 3.5 можно сделать вывод, что влияние пакера на удельные потери теплоты через утепленную конструкцию из железобетона ниже, чем на удельные потери теплоты через неутепленную конструкцию.

Стоит отметить, что удельные потери теплоты через пакер, заполненный инъекционным раствором, для случая неутепленной конструкции ($\chi_{\text{пакера}} = 0,011$) из железобетона в 5,5 раз выше, чем для утепленного варианта ($\chi_{\text{пакера}} = 0,002$) этой же конструкции.

Определено, что несмотря на то, что введение инъекционного раствора в трещину стены здания из железобетона уменьшает линейную плотность теплового потока через стену, введение пакера с инъекционным раствором увеличивает тепловой поток.

Выявлено, что утепление конструкции снижает проходящий через неё тепловой поток, и приводит к снижению удельных потерь теплоты, вызванных пакером, заполненным инъекционным раствором.

3.3. Разработка номограмм удельных потерь теплоты для пакеров по результатам математического моделирования температурного поля

Диаметр и глубина установки пакера влияют на потери теплоты. Для систематизации результатов математического моделирования и возможности их последующего применения в проектировании зданий и сооружений результаты расчетов были сведены в номограммы удельных потоков теплоты через пакеры стен здания, заполненные инъекционным раствором. Номограммы разрабатывались для стен зданий, приведенных в таблице 2.2, при различных вариантах глубины установки и диаметра пакера в вариантах с утеплителем и без утеплителя.

Диаметр пакера принимался от 10 мм до 18 мм (рассчитывались значения 10 мм, 13 мм, 16 мм, 18 мм).

Глубина установки пакера задавалась от 50 мм, а далее с шагом 20 мм для стены из блоков из пенобетона и 50 мм для стен из кладки из кирпича и стен из железобетона.

Предложен алгоритм построения номограммы удельных потоков теплоты через пакеры установленные в стенах зданий, заполненные инъекционным раствором:

1. Выбирается материал основания ограждающей конструкции стены здания и материал утеплителя (для случая утепленного узла).
2. Строится геометрическая модель стены здания без пакера.
3. Для выбранной стены здания производится построение температурного поля. По результатам математического моделирования определяется тепловой поток, проходящий через рассчитываемый фрагмент стены здания без пакера, $Q_{\text{без пакера}}$.
4. В геометрическую модель стены здания добавляется пакер, заполненный инъекционным раствором. При этом диаметр пакера принимается 10 мм, а глубина установки пакера принимается 50 мм.

5. Для выбранного узла производится построение температурного поля. По результатам математического моделирования определяется тепловой поток, проходящий через рассчитываемый фрагмент стены здания с установленным пакером, заполненным инъекционным раствором, $Q_{\text{с пакером}}$.

6. Вычисляются удельные потери теплоты через установленный пакер, заполненный инъекционным раствором, по формуле (3.3).

7. Затем глубина установки пакера увеличивается с определенным шагом. Для каждого случая повторяется моделирование и расчеты, описанные в пунктах 5 и 6.

8. Затем диаметр пакера увеличивается. Диаметр последовательно принимается 13 мм, 16 мм, 18 мм. Для каждого случая повторяется моделирование и расчеты, описанные в пунктах 5, 6 и 7.

9. Результаты расчетов представляются в виде номограммы удельных потоков теплоты через пакер, установленный в стене здания, заполненный инъекционным раствором.

Произведено построение номограмм удельных потоков теплоты через пакеры, установленные в стенах зданий, заполненные инъекционным раствором, для конструкций, приведенных в таблице 2.2, при различных вариантах диаметра пакера и глубины установки пакера.

Представлены номограммы для определения удельных потерь теплоты через установленные в стенах здания пакеры, заполненные инъекционным раствором, для стены из блоков из пенобетона толщиной 0,2 м в вариантах без утеплителя (рисунок 3.6 а) и с утеплителем (рисунок 3.6 б).

Представлены номограммы для определения удельных потерь теплоты через установленные в стенах здания пакеры, заполненный инъекционным раствором, для стены из блоков из кладки из кирпича толщиной 0,38 м в вариантах без утеплителя (рисунок 3.6 в) и с утеплителем (рисунок 3.6 г).

Представлены номограммы для определения удельных потерь теплоты через установленные в стенах здания пакеры, заполненный инъекционным раствором,

для стены из железобетона толщиной 0,38 м в вариантах без утеплителя (рисунок 3.6 д) и с утеплителем (рисунок 3.6 е).

На оси абсцисс номограмм для определения удельных потерь теплоты через установленные в стенах зданий пакеры, заполненные инъекционным раствором, (рисунок 3.6) отложена глубина установки пакера, по оси ординат – удельные потери теплоты через пакер, цифры от 1 до 4 иллюстрируют варианты диаметра пакера от 10 мм до 18 мм. Разработанные номограммы позволяют определять величину удельных потерь теплоты через пакеры, установленные в различных стенах здания, выполненные из разных материалов, при разных диаметрах и глубинах установки пакеров упрощенно графически без построения температурных полей.

Из рисунка 3.6 видно, что наибольшее увеличение теплового потока из-за влияния пакера, заполненного инъекционным раствором, наблюдается в стенах из блоков из пенобетона, а наименьшее в стене из железобетона.

3.4. Алгоритм использования номограмм удельных потерь теплоты через пакеры, установленные в стенах здания

Для использования номограмм в практических инженерных расчетах необходимо графически определить удельные потери теплоты через пакер в стене здания по значениям глубины установки пакера в стену $d_{\text{гл.пакера}}$ и диаметра пакера $\varnothing_{\text{пакера}}$.

Предложен алгоритм использования номограммы удельных потерь теплоты через пакеры в стенах зданий:

1. Определяется глубина установки пакера в стену $d_{\text{гл.пакера}}$ и диаметр пакера $\varnothing_{\text{пакера}}$.
2. Выбирается номограмма удельных потерь теплоты через пакер, установленный в стене здания, соответствующий рассматриваемому случаю.

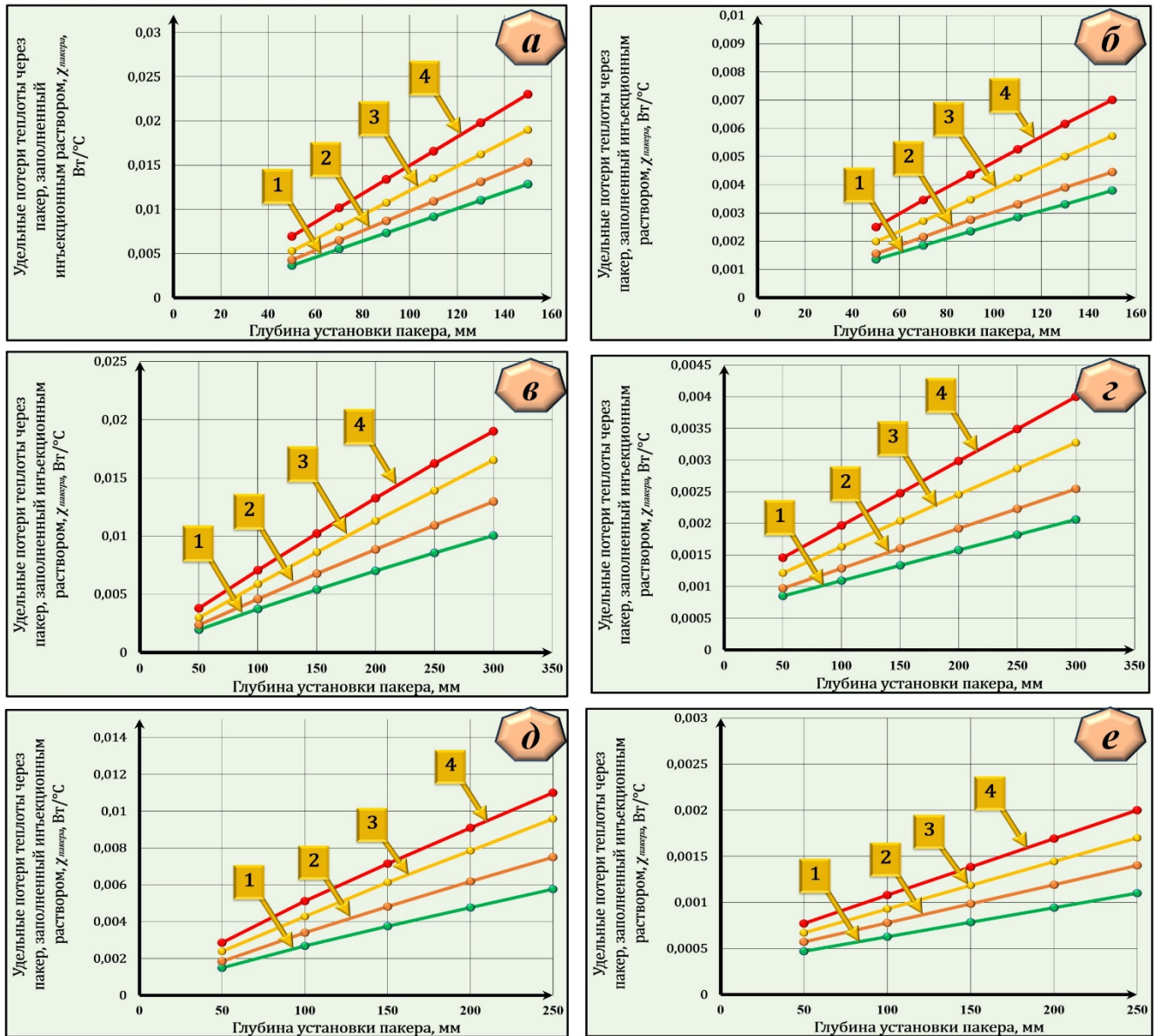


Рисунок 3.6. Номограммы для определения удельных потерь теплоты через установленные в стенах зданий пакеры, заполненные инъекционным раствором (а – пенобетон толщиной 0,2 м; б – пенобетон толщиной 0,2 м с утеплителем толщиной 0,1 м; в – кирпич толщиной 0,38 м; г – кирпич толщиной 0,38 м с утеплителем толщиной 0,1 м; д – железобетон толщиной 0,3 м; е – железобетон толщиной 0,3 м с утеплителем толщиной 0,1 м; цифрами обозначены варианты диаметра пакера: 1 – 10 мм; 2 – 13 мм; 3 – 16; 4 – 18 мм).

3. На оси абсцисс номограммы откладывается значение глубины установки пакера в стену $d_{\text{гл.пакера}}$.

4. Из данной точки проводится прямая перпендикулярная оси абсцисс до пересечения с линией, определяющей диаметр пакера $\varnothing_{\text{пакера}}$.

5. Из определенной в пункте 4 точки необходимо провести вторую прямую, перпендикулярную оси ординат, до пересечения с осью ординат. По значению на оси ординат определяются удельные потери теплоты через пакер в стене здания $\chi_{\text{пакера}}$.

6. В случае, если в стене здания присутствуют несколько пакеров с различной глубиной установки $d_{\text{гл.пакера}}$ и различными диаметрами $\varnothing_{\text{пакера}}$, то для каждого случая определяются свои значения удельных потерь теплоты через пакер в стене здания $\chi_{\text{пакера}}$.

3.5. Выводы по главе 3

С помощью математического моделирования проводилась оценка влияния пакеров в кирпичных, пенобетонных и железобетонных стенах на величину удельных потерь теплоты. При этом предложено рассматривать пакер как точечную теплотехническую неоднородность и удельные потери теплоты через пакер определять с помощью математического моделирования трехмерного температурного поля. Математическая модель базируется на дифференциальном уравнении теплопроводности в трехмерной постановке. На краях ограждающей конструкции, контактирующих с воздухом, задавались граничные условия третьего рода. На остальных гранях стены используются граничные условия второго рода, задающие условия теплоизоляции. Между материалами различных слоев (между утеплителем и основанием, между пакером и стеной, между пакером и инъекционным раствором) используются граничные условия четвертого рода, описывающие равенство температур и теплового потока в точках соприкосновения различных материалов.

Получено по результатам математического моделирования, что установленный в стене здания пакер, искажает поле температуры вблизи места установки.

Рассчитано, что для стены здания из блоков из пенобетона толщиной 0,2 м установка пакера диаметром 18 при глубине установки 0,15 м увеличивает тепловой потока с 28,83 Вт до 29,82 Вт. Удельные потери теплоты составляют 0,023 Вт/°С. Для варианта данной стены, утепленной 0,1 м минеральной ваты, установка пакера диаметром 18 при глубине установки 0,15 м увеличивает тепловой поток с 10,77 Вт до 11,07 Вт. Удельные потери теплоты составляют 0,007 Вт/°С.

Выявлено, что для стены здания из кладки из кирпича толщиной 0,38 м установка пакера диаметром 18 при глубине установки 0,3 м увеличивает тепловой поток с 68,52 Вт до 69,34 Вт. Удельные потери теплоты составляют 0,019 Вт/°С. Для варианта данной стены, утепленной 0,1 м минеральной ваты, установка пакера диаметром 18 при глубине установки 0,3 м увеличивает тепловой поток с 13,75 Вт до 13,92 Вт. Удельные потери теплоты составляют 0,004 Вт/°С. Определено, что для стены здания из железобетона толщиной 0,3 м установка пакера диаметром 18 при глубине установки 0,25 м увеличивает тепловой поток с 140,76 Вт до 141,23 Вт. Удельные потери теплоты составляют 0,011 Вт/°С.

Проведены номограммы удельных потерь теплоты для пакеров по результатам математического моделирования температурного поля. Номограммы позволяют определять величину удельных потерь теплоты через пакеры, установленные в различных стенах здания, выполненные из разных материалов, при разных диаметрах и глубинах установки пакеров упрощенно графически без построения температурных полей. При построении номограмм использовались 4 варианта диаметра пакера: 10 мм, 13 мм, 16 мм, 18 мм. Глубина установки пакера задавалась от 50 мм, а далее с шагом 20 мм для стены из блоков из пенобетона и 50 мм для стен из кладки из кирпича и стен из железобетона. Разработан алгоритм построения номограммы удельных потоков теплоты через пакеры установленные в стенах зданий, заполненные инъекционным раствором.

Разработан алгоритм использования номограмм удельных потерь теплоты через пакеры в стенах зданий, заполненные инъекционным раствором, который позволяет определить удельные потери теплоты через пакеры по значениям диаметра пакера и его глубине установки.

Получено, что наибольшее увеличение теплового потока из-за влияния пакера, заполненного инъекционным раствором, наблюдается в стенах из блоков из пенобетона, а наименьшее в стене из железобетона.

ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНЫХ ПОТЕРЬ ТЕПЛОТЫ, ПРОХОДЯЩИХ ЧЕРЕЗ ТРЕЩИНЫ СТЕН ЗДАНИЙ, ЗАПОЛНЕННЫЕ ИНЪЕКЦИОННЫМ РАСТВОРОМ

Для подтверждения и верификации полученных результатов математического моделирования по определению удельных потерь теплоты через трещины стен зданий, заполненные инъекционным раствором, было предложено провести лабораторные эксперименты по измерению удельных потоков теплоты через стеновые ограждающие конструкции при трещинах. Для этой цели было сконструировано и построено новое экспериментальное устройство, а также разработан способ определения удельных потерь теплоты через трещину стены здания, заполненную инъекционным раствором. В качестве материалов основания ограждающих конструкций были использованы пенобетон, кирпич и железобетон. Эксперименты проводились с использованием поверенного лабораторного оборудования.

4.1. Разработка подхода для определения удельных потерь теплоты, вызванных трещинами стен зданий

Существует большое количество различных экспериментальных устройств по определению сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций зданий [21, 22]. Данные устройства позволяют с разной степенью точности определять значения сопротивления теплопередаче ограждения как в натурных, так и в лабораторных условиях.

Для экспериментального определения удельных потерь теплоты, вызванных трещинами стен зданий известные подходы необходимо усовершенствовать. Это вызвано двумя обстоятельствами. Во-первых, в эксперименте необходимо определить не приведенное сопротивление теплопередаче, а другую величину –

удельные потери теплоты. Во-вторых, нужно отделить поток, проходящий через трещину стены здания, от потока, проходящего через стену здания без трещины.

Для этих целей был предложен следующий подход по определению удельных потерь теплоты трещин стен здания, заполненных инъекционным раствором:

1. Строится образец исследуемой стены здания.
2. Образец стены помещается в помещение с температурой 20 градусов и относительной влажностью воздуха 50 % на 6 месяцев для устранения начальной влажности строительных материала, возникшей в момент монтажа.
3. Проводится первый эксперимент, в котором определяются удельные потери теплоты через стену без трещины $\chi_{\text{эксп. без трещины}}$.
4. На стену наносится трещина, которая затем заполняется инъекционным раствором.
5. Образец стены с трещиной, заполненной инъекционным раствором, помещается в помещение с температурой 20 градусов и относительной влажностью воздуха 50 % на 6 месяцев для устранения влажности, возникшей при инъектировании трещины.
6. Проводится второй эксперимент, в котором определяются удельные потери теплоты через стену с трещиной, заполненной инъекционным раствором $\chi_{\text{эксп. с трещиной}}$.
7. Удельные потери теплоты, обусловленные трещиной стены здания, вычисляются как разность удельных потерь теплоты через стену с трещиной, заполненной инъекционным раствором, и стену без трещины по формуле:

$$\psi_{\text{эксп. трещины}} = (\chi_{\text{эксп. с трещиной}} - \chi_{\text{эксп. без трещины}}) / l_{\text{трещины}}. \quad (4.1)$$

где

$\psi_{\text{эксп. с трещиной}}$ — удельные потери теплоты через трещину стены здания, заполненную инъекционным раствором, определенные по результатам эксперимента, Вт/(м·°C);

$\chi_{\text{эксп. с трещиной}}$ – удельные потери теплоты через стену здания с трещиной, заполненной инъекционным раствором, определенные по результатам эксперимента, Вт/°С;

$\chi_{\text{эксп. без трещины}}$ – удельные потери теплоты стену здания без трещины, определенные по результатам эксперимента, Вт/°С;

$l_{\text{трещины}}$ – протяженность трещины, м.

Представлен алгоритм определения удельных потерь теплоты через трещину стены здания, заполненную инъекционным раствором. (рисунок 4.1).

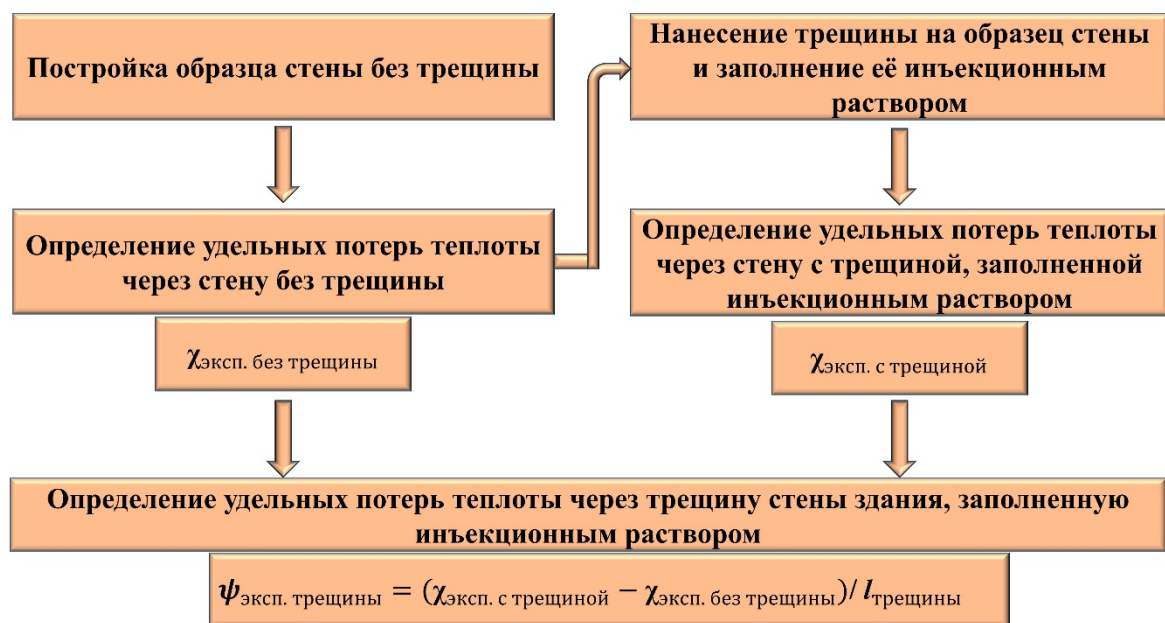


Рисунок 4.1. Алгоритм определения удельных потерь теплоты через трещину стены здания, заполненную инъекционным раствором.

4.2. Разработка экспериментального устройства для определения удельных потерь теплоты, вызванных трещинами стен зданий

Представлена схема экспериментального устройства с установленным испытуемым образцом стены здания (рисунок 4.2).

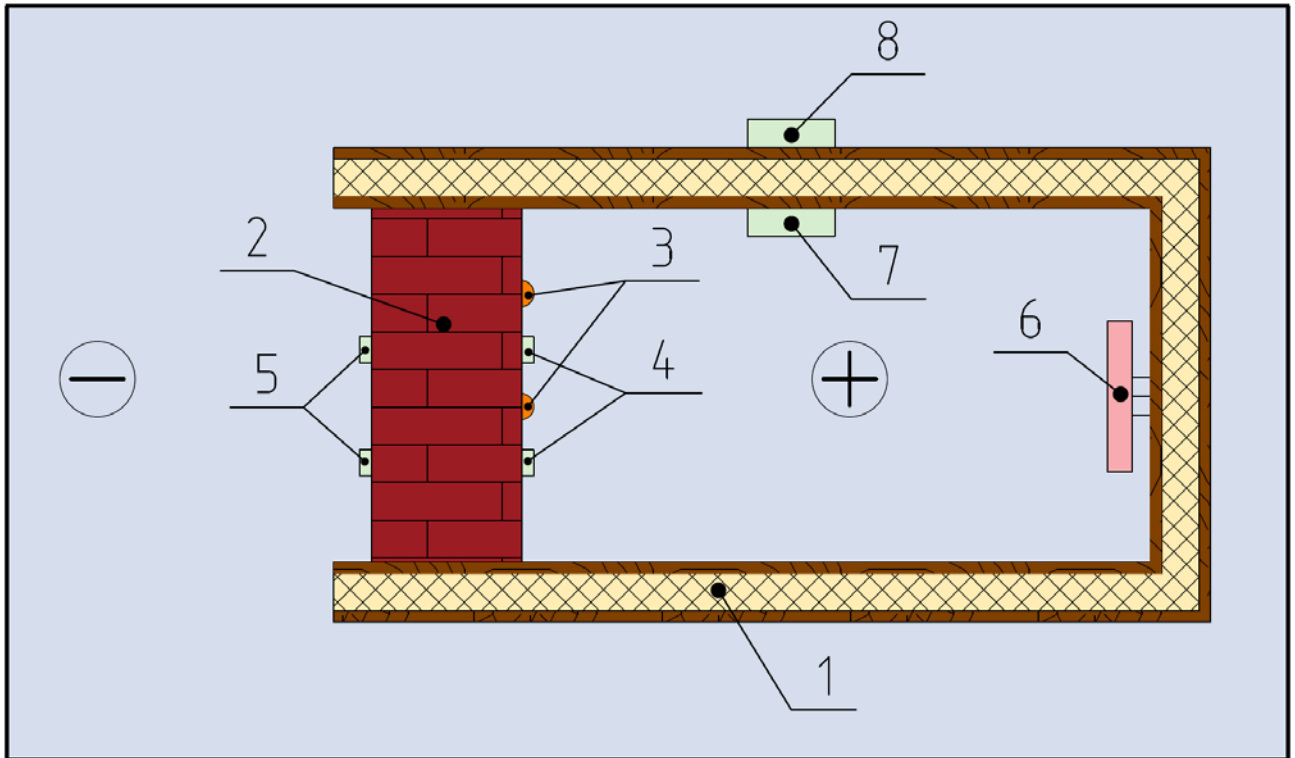


Рисунок 4.2. Схема экспериментального устройства с установленным испытуемым образцом стены здания (1 – короб с утепленными стенками; 2 – испытуемый образец; 3 – датчики поверхностной плотности теплового потока; 4 – датчики температуры внутренней поверхности стены; 5 – датчики температуры наружной поверхности стены; 6 – нагревательный элемент; 7 – датчик температуры воздуха внутри короба; 8 – датчик температуры воздуха снаружи короба).

Экспериментальное устройство представляет собой П-образный короб с утепленными стенками. Одна из стенок которого содержит окно, в котором устанавливается исследуемый образец стены здания. Внутри короба размещают нагревательный элемент. В устройстве предусмотрено размещение датчиков, которые в автоматическом режиме регистрируют температуру воздуха снаружи испытательной установки, температуру воздуха внутри испытательной установки, температуры на наружной и внутренних поверхностях испытуемого образца стены здания и тепловой поток, проходящий через испытуемый образец.

Измерения проводились с помощью измерителя теплофизических величин «ТЕПЛОГРАФ» (Россия, компания «ИНТЕРПРИБОР»).

В экспериментальной установке использовался регистратор, который подключался к модулю-07. Модуль-07 подключался к датчикам теплового потока и температуры для создания зон контроля термического сопротивления.

Представлены фотографии регистратора и модуля-07 (рисунок 4.3).



Рисунок 4.3. Фотографии регистратора и модуля-07 (а – регистратор; б – модуль-07).

В установке использовались два датчика температуры среды, которые размещались внутри и снаружи экспериментального устройства соответственно (позиции 7 и 8 на рисунке 4.2).

На испытуемый образец стены здания также устанавливались 4 группы датчиков. Каждая группа состояла из 3 датчиков: 1 датчика поверхностной плотности теплового потока и 2 датчиков температуры поверхности. При этом каждая группа датчиков устанавливалась следующим образом: на наружной поверхности испытуемого образца устанавливался датчик температуры наружной поверхности (позиция 5 на рисунке 4.2); на внутренней поверхности испытуемого образца симметрично установленному на наружной поверхности датчику температуры устанавливался датчик температуры внутренней поверхности (позиция 4 на рисунке 4.2) и датчик поверхностной плотности теплового потока (позиция 3 на рисунке 4.2). Таким образом, всего в экспериментальной установке

использовалось 14 датчиков (4 датчика поверхностной плотности теплового потока; 8 датчиков температуры поверхности; 2 датчика температуры среды).

Представлены фотографии датчиков температуры среды, температуры поверхности и поверхностной плотности теплового потока (рисунок 4.4).



Рисунок 4.4. Фотографии датчиков температуры среды, температуры поверхности и поверхностной плотности теплового потока (а – датчик температуры среды; б – датчик температуры поверхности (устанавливался на наружной поверхности испытуемого образца в экспериментальном устройстве); в – совмещенные датчики температуры поверхности и поверхностной плотности теплового потока (устанавливались на внутренней поверхности испытуемого образца в экспериментальном устройстве)).

Представлены фотографии экспериментального устройства с установленным испытуемым образцом стены здания из железобетона с указанием мест размещения датчиков температуры и поверхностной плотности теплового потока (рисунок 4.5).

4.3. Описание проведения и обработки результатов экспериментального исследования

Испытания проводятся в два этапа. На первом этапе проводится эксперимента на образце стены здания без трещины. На втором этапе испытания повторяются на этом же образце стены здания, но уже с нанесенной трещиной, заполненной инъекционным раствором.

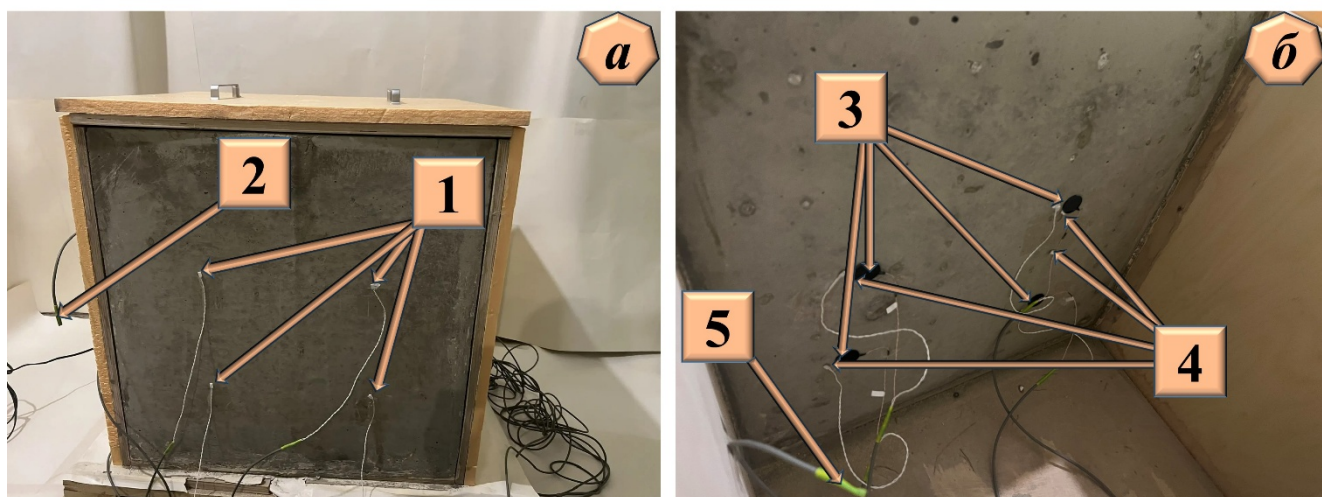


Рисунок 4.5. Фотографии экспериментального устройства с установленным испытуемым образцом стены здания из железобетона с указанием мест размещения датчиков температуры и поверхностной плотности теплового потока (а – вид экспериментального устройства снаружи; б – вид экспериментального устройства изнутри; 1 – датчики температуры наружной поверхности испытуемого образца; 2 – датчик температуры воздуха снаружи устройства; 3 – датчики поверхностной плотности теплового потока; 4 – датчики температуры внутренней поверхности испытуемого образца; 5 – датчик температуры воздуха внутри устройства).

Повторное проведение испытания на одном и том же испытуемом образце (сначала до нанесения трещины, затем после нанесения трещины и заполнения повреждения инъекционным раствором) позволяет корректно оценить искажение температурного поля и величину поверхностной плотности теплового потока, вызванные трещиной и инъекционным раствором внутри неё.

При испытаниях температура внутри короба устанавливалась $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, в помещении поддерживалась температура $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Таким образом, температурный перепад между температурами внутри и снаружи устройства составил $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Регистрация показаний с датчиков температуры и поверхностной плотности теплового потока происходила в автоматическом режиме с интервалом в 1 минуту.

Эксперимент проводился до момента, когда показания датчиков температуры наружной и внутренней поверхностей и поверхностной плотности теплового потока прекращали меняться, что свидетельствовало о наступлении стационарной теплопередаче внутри испытуемого образца стены здания.

Средняя температура на наружной поверхности испытуемого образца в экспериментальной установке определялась по формуле:

$$t_{ср.н.нов} = \frac{\sum t_{i.н.нов}}{o}. \quad (4.2)$$

где

$t_{ср.н.нов}$ – средняя температура наружной поверхности испытуемого образца в экспериментальной установке, °С;

$t_{i.н.нов}$ – температура наружной поверхности испытуемого образца в экспериментальной установке, зарегистрированная i -ым датчиком температуры, °С;

o – число датчиков температуры поверхности, установленных на наружной поверхности испытуемого образца в экспериментальной установке.

Средняя температура на внутренней поверхности испытуемого образца в экспериментальной установке вычислялась по формуле:

$$t_{ср.в.нов} = \frac{\sum t_{i.в.нов}}{v}. \quad (4.3)$$

где

$t_{ср.в.нов}$ – средняя температура внутренней поверхности испытуемого образца в экспериментальной установке, °С;

$t_{i.в.нов}$ – температура внутренней поверхности испытуемого образца в экспериментальной установке, зарегистрированная i -ым датчиком температуры, °С;

v – число датчиков температуры поверхности, установленных на внутренней поверхности испытуемого образца в экспериментальной установке.

Среднее значение поверхностной плотности теплового потока, проходящего через испытуемый образец в экспериментальной установке, рассчитывалось по формуле:

$$q_{ср.в.пов} = \frac{\sum q_{i.в.пов}}{g}. \quad (4.4)$$

где

$q_{ср.в.пов}$ – среднее значение поверхностной плотности теплового потока, проходящего через испытуемый образец в экспериментальной установке, Вт/м²;

$q_{i.в.пов}$ – поверхностная плотность теплового потока, проходящая через испытуемый образец в экспериментальной установке, зарегистрированная i -ым датчиком поверхностной плотности теплового потока, Вт/м²;

g – число датчиков поверхностной плотности теплового потока, установленных на внутренней поверхности испытуемого образца в экспериментальной установке.

Температурный перепад между внутренней и наружной поверхностями испытуемого образца в экспериментальной установке определялся по формуле:

$$\Delta t_{пов} = t_{ср.в.пов} - t_{ср.н.пов}. \quad (4.5)$$

где

$\Delta t_{пов}$ – температурный перепад между внутренней и наружной поверхностями испытуемого образца в экспериментальной установке, °С.

После проведения эксперимента на образце стены здания без трещины определяются величины: $\Delta t_{пов. без трещины}$, $q_{ср.в.пов. без трещины}$ и $S_{образца}$.

После проведения эксперимента на образце стены здания с трещиной, заполненной инъекционным раствором, определяются величины: $\Delta t_{пов. с трещиной}$, $q_{ср.в.пов. с трещиной}$ и $l_{трещины}$.

Удельные потери теплоты, обусловленные трещиной и инъекционным раствором в ней, могут быть вычислены по формуле:

$$\psi_{\text{эксп. трещины}} = \left(\frac{q_{\text{ср.в.пов. с трещиной}}}{\Delta t_{\text{пов. с трещиной}}} - \frac{q_{\text{ср.в.пов. без трещины}}}{\Delta t_{\text{пов. без трещины}}} \right) \cdot \frac{s_{\text{образца}}}{l_{\text{трещины}}}. \quad (4.6)$$

где

$q_{\text{ср.в.пов. с трещиной}}$ – среднее значение поверхностной плотности теплового потока, проходящего через испытуемый образец с трещиной, заполненной инъекционным раствором, в экспериментальной установке, Вт/м²;

$\Delta t_{\text{пов. с трещиной}}$ – температурный перепад между внутренней и наружной поверхностями испытуемого образца с трещиной, заполненной инъекционным раствором, в экспериментальной установке, °С;

$q_{\text{ср.в.пов. без трещины}}$ – среднее значение поверхностной плотности теплового потока, проходящего через испытуемый образец без трещины в экспериментальной установке, Вт/м²;

$\Delta t_{\text{пов. без трещины}}$ – температурный перепад между внутренней и наружной поверхностями испытуемого образца без трещины в экспериментальной установке, °С;

$s_{\text{образца}}$ – площадь образца, м²;

Внесем величину $s_{\text{образца}}$ внутрь скобок в правой части уравнения 4.6 получим:

$$\psi_{\text{эксп. трещины}} = \left(\frac{q_{\text{ср.в.пов. с трещиной}}}{\Delta t_{\text{пов. с трещиной}}} \cdot s_{\text{образца}} - \frac{q_{\text{ср.в.пов. без трещины}}}{\Delta t_{\text{пов. без трещины}}} \cdot s_{\text{образца}} \right) \cdot \frac{1}{l_{\text{трещины}}}. \quad (4.7)$$

Обозначим:

$$\chi_{\text{эксп. с трещиной}} = \frac{q_{\text{ср.в.пов. с трещиной}}}{\Delta t_{\text{пов. с трещиной}}} \cdot s_{\text{образца}}. \quad (4.8)$$

$$\chi_{\text{эксп. без трещины}} = \frac{q_{\text{ср.в.пов. без трещины}}}{\Delta t_{\text{пов. без трещины}}} \cdot s_{\text{образца}}. \quad (4.9)$$

Подставляя правые части уравнения (4.8) и (4.9) в правую часть уравнения (4.7), получим предложенное уравнение (4.1).

При статистической обработке экспериментальных данных применялся критерий Шапиро-Улика для проверки нормальности распределения. Для оценки влияния трещины на удельные потери теплоты использовался парный критерий Стьюдента.

Отличия считались статистически значимыми при p -уровне значимости $p < 0,05$.

4.4. Экспериментальное определение удельных потерь теплоты через стены здания при трещинах

Для экспериментального определения удельного потока теплоты через трещины, заполненные инъекционным раствором, было проведено экспериментальное исследование на образцах пенобетона, кирпича и железобетона.

Из каждого материала было построено по 10 образцов стен зданий для испытаний в предложенном экспериментальном устройстве.

На первом этапе выполнялись эксперименты на образцах без трещины.

На втором этапе – на образцах с трещиной.

Всего было проведено 60 экспериментов.

Представлено количество построенных испытываемых образцов стен зданий и количество проведенных экспериментов (таблица 4.1).

Для каждого образца определялись значения удельных потерь теплоты до нанесения трещины и после нанесения трещины и её ремонта с применением инъекционного раствора, которые делились на длину трещины.

Таким образом, вычислялась величина $\chi / l_{\text{трещины}}$.

Данные экспериментов заносятся в таблицу.

Представлены значения удельных потерь теплоты через испытываемый образец стены здания отнесенные к 1 метру трещины (таблица 4.2).

Таблица 4.1. Количество построенных испытуемых образцов стен зданий и количество проведенных экспериментов

1	Вариант испытуемого образца стены здания	Количество построенных образцов стен зданий, шт	Количество проведенных экспериментов
1	Пенобетон без трещины	10	10
2	Пенобетон с трещиной	10	10
3	Кирпич без трещины	10	10
4	Кирпич с трещиной	10	10
5	Железобетон без трещины	10	10
6	Железобетон с трещиной	10	10
Итого:		60	60

Таблица 4.2. Значения удельных потерь теплоты через испытуемый образец стены здания отнесенные к 1 метру трещины $\chi / l_{\text{трещины}}$, Вт/(м·°С)

№ опыта	Стена из пенобетона		Стена из кирпича		Стена из железобетона	
	Без трещины	С трещиной	Без трещины	С трещиной	Без трещины	С трещиной
1	0,698	0,795	1,61	1,664	3,281	3,238
2	0,699	0,793	1,612	1,665	3,28	3,237
3	0,698	0,794	1,611	1,663	3,278	3,24
4	0,696	0,793	1,613	1,662	3,28	3,239
5	0,697	0,793	1,611	1,662	3,282	3,238
6	0,698	0,795	1,61	1,663	3,279	3,239
7	0,696	0,794	1,611	1,665	3,28	3,24
8	0,695	0,792	1,613	1,664	3,279	3,239
9	0,696	0,791	1,612	1,663	3,281	3,238
10	0,696	0,793	1,61	1,663	3,28	3,239
Среднее значение	0,697± ±0,0004	0,793± ±0,0004	1,611± ±0,0004	1,663± ±0,0003	3,28± ±0,0004	3,239± ±0,0003

Представлены фотографии предложенных экспериментальных устройств с установленными на них образцами стен зданий без трещин (рисунок 4.6а, рисунок 4.6в, рисунок 4.6д) и с трещинами (рисунок 4.6б, рисунок 4.6г, рисунок 4.6е).



Рисунок 4.6. Фотографии предложенных экспериментальных устройств с установленными на них образцами стен зданий (а – пенобетон; б – пенобетон с отремонтированной трещиной; в – кирпич; г – кирпич с отремонтированной трещиной; д – железобетон; е – железобетон с отремонтированной трещиной).

Для образца стены из кладки из блоков из пенобетона без трещины величина $\chi / l_{\text{трещины}}$ составила $0,697 \pm 0,0004 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$.

После нанесения трещины и её ремонта инъекционным раствором величина $\chi / l_{\text{трещины}}$ статистически значимо возросла до $0,793 \pm 0,0004 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$ ($p < 0,05$).

Для образца стены из кладки из кирпича без трещины величина $\chi / l_{\text{трещины}}$ составила $1,611 \pm 0,0004 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$.

После нанесения трещины и её ремонта инъекционным раствором величина $\chi / l_{\text{трещины}}$ статистически значимо возросла до $1,663 \pm 0,0003 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$ ($p < 0,05$). Для образца стены из кладки из железобетона без трещины величина $\chi / l_{\text{трещины}}$ составила $3,28 \pm 0,0004 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$.

После нанесения трещины и её ремонта инъекционным раствором величина $\chi / l_{\text{трещины}}$ статистически значимо снизилась до $3,239 \pm 0,0003 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$ ($p < 0,05$).

4.5. Сопоставление результатов экспериментальных исследований по определению удельных потерь теплоты через трещины стен зданий с данными математического моделирования

Проведено сравнение изменения величины $\chi / l_{\text{трещины}}$ до нанесения трещины и после нанесения трещины, полученной по результатам математического моделирования с величиной $\chi / l_{\text{трещины}}$ полученной экспериментально. Были построены графики для экспериментально и численно определенной величины $\chi / l_{\text{трещины}}$ для стены здания кладки из блоков из пенобетона, кладки из кирпича, железобетона.

Представлено сравнение значений удельных потерь теплоты по результатам экспериментального исследования и по результатам математического моделирования (таблица 4.3).

Таблица 4.3. Сравнение значений удельных потерь теплоты по результатам экспериментального исследования и по результатам математического моделирования

№	Вариант стены здания		Удельные потери теплоты через стену здания отнесенные к 1 метру трещины $\chi / l_{\text{трещины}}$, Вт/(м·°С)	
			По результатам экспериментального исследования	По результатам математического моделирования
1	Стена из кладки из блоков из пенобетона	Без трещины	0,697±0,0004	0,670
		С трещиной	0,793±0,0004	0,764
2	Стена из кладки из кирпича	Без трещины	1,611±0,0004	1,593
		С трещиной	1,663±0,0003	1,643
3	Стена из железобетона	Без трещины	3,280±0,0004	3,273
		С трещиной	3,239±0,0003	3,233

Представлено сравнение удельных потерь теплоты через стену из кладки из блоков из пенобетона толщиной 0,2 м, отнесенных к 1 метру трещины, до нанесения и после нанесения и ремонта трещины по результатам экспериментального исследования и по результатам математического моделирования (рисунок 4.7).

Из рисунка 4.7 видно, что изменение удельных потерь теплоты через стену из кладки из блоков из пенобетона толщиной 0,2 м, отнесенных к 1 метру трещины, по результатам математического моделирования и количественно и качественно совпадают с результатами эксперимента. В эксперименте величина $\chi / l_{\text{трещины}}$ увеличилась с 1,611±0,0004 Вт/(м·°С) до 1,663±0,0003 Вт/(м·°С). По результатам математического моделирования величина $\chi / l_{\text{трещины}}$ увеличилась с 0,670 Вт/(м·°С) до 0,764 Вт/(м·°С).

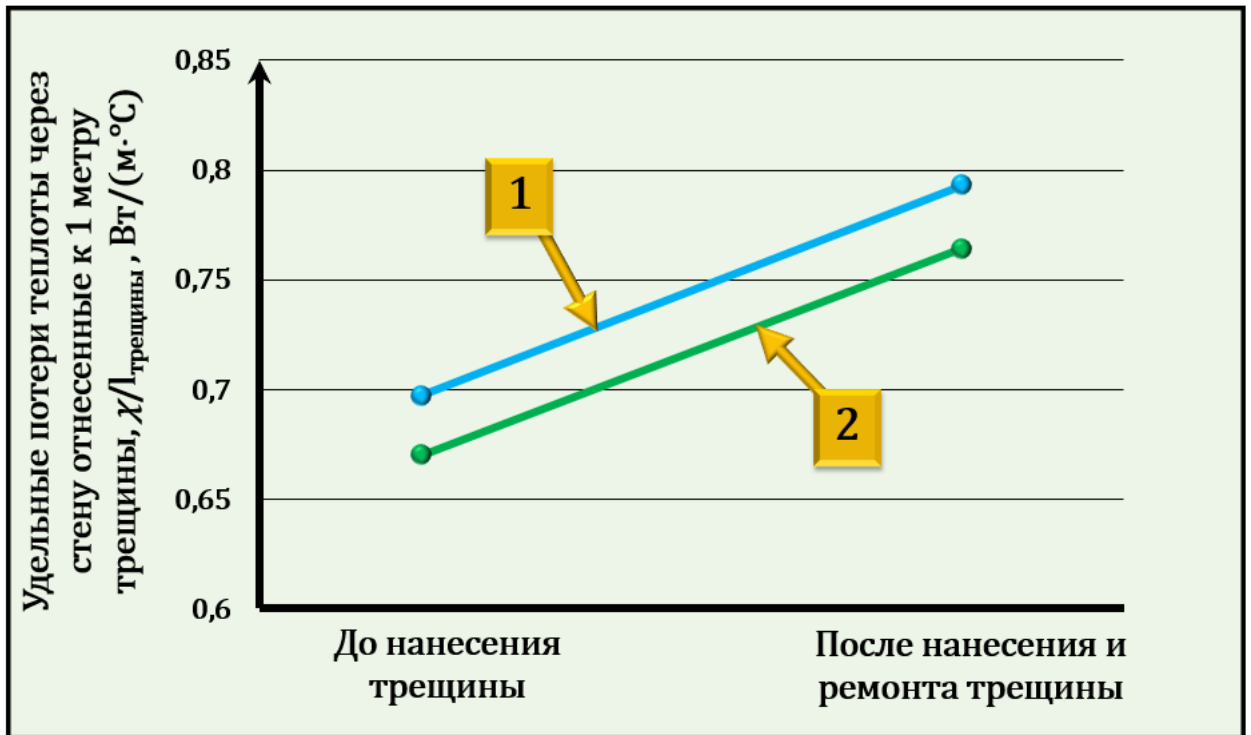


Рисунок 4.7. Сравнение удельных потерь теплоты через стену из кладки из блоков из пенобетона толщиной 0,2 м, отнесенных к 1 метру трещины до нанесения и после нанесения и ремонта трещины (1 – по результатам экспериментального исследования; 2 – по результатам математического моделирования).

Представлено сравнение удельных потерь теплоты через стену из кладки из кирпича толщиной 0,38 м, отнесенных к 1 метру трещины, до нанесения и после нанесения и ремонта трещины по результатам экспериментального исследования и по результатам математического моделирования (рисунок 4.8).

Из рисунка 4.8 видно, что изменение удельных потерь теплоты через стену из кладки из кирпича толщиной 0,38 м, отнесенных к 1 метру трещины, по результатам математического моделирования и количественно и качественно совпадают с результатами эксперимента. В эксперименте величина $\chi / l_{\text{трещины}}$ увеличилась с $1,611 \pm 0,0004$ Вт/(м·°С) до $1,663 \pm 0,0003$ Вт/(м·°С). По результатам математического моделирования величина $\chi / l_{\text{трещины}}$ увеличилась с 1,593 Вт/(м·°С) до 1,643 Вт/(м·°С).

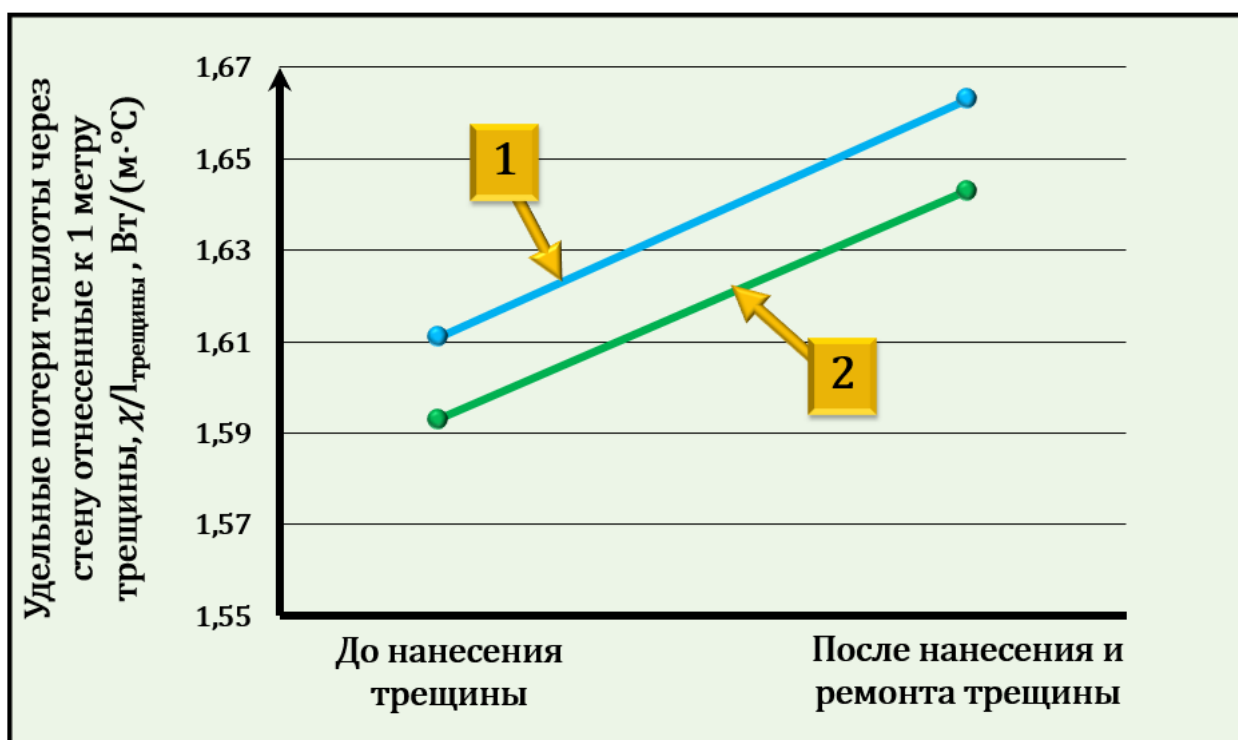


Рисунок 4.8. Сравнение удельных потерь теплоты через стену из кладки из кирпича толщиной 0,38 м, отнесенных к 1 метру трещины до нанесения и после нанесения и ремонта трещины (1 – по результатам экспериментального исследования; 2 – по результатам математического моделирования).

Представлено сравнение удельных потерь теплоты через стену из железобетона толщиной 0,3 м, отнесенных к 1 метру трещины, до нанесения и после нанесения и ремонта трещины по результатам экспериментального исследования и по результатам математического моделирования (рисунок 4.9).

Из рисунка 4.9 видно, что изменение удельных потерь теплоты через стену из железобетона толщиной 0,3 м, отнесенных к 1 метру трещины, по результатам математического моделирования и количественно и качественно совпадают с результатами эксперимента. В эксперименте величина $\chi/l_{\text{трещины}}$ уменьшилась с $3,280 \pm 0,0004 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{С})$ до $3,239 \pm 0,0003 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{С})$. По результатам математического моделирования величина $\chi/l_{\text{трещины}}$ уменьшилась с $3,273 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{С})$ до $3,233 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{С})$.

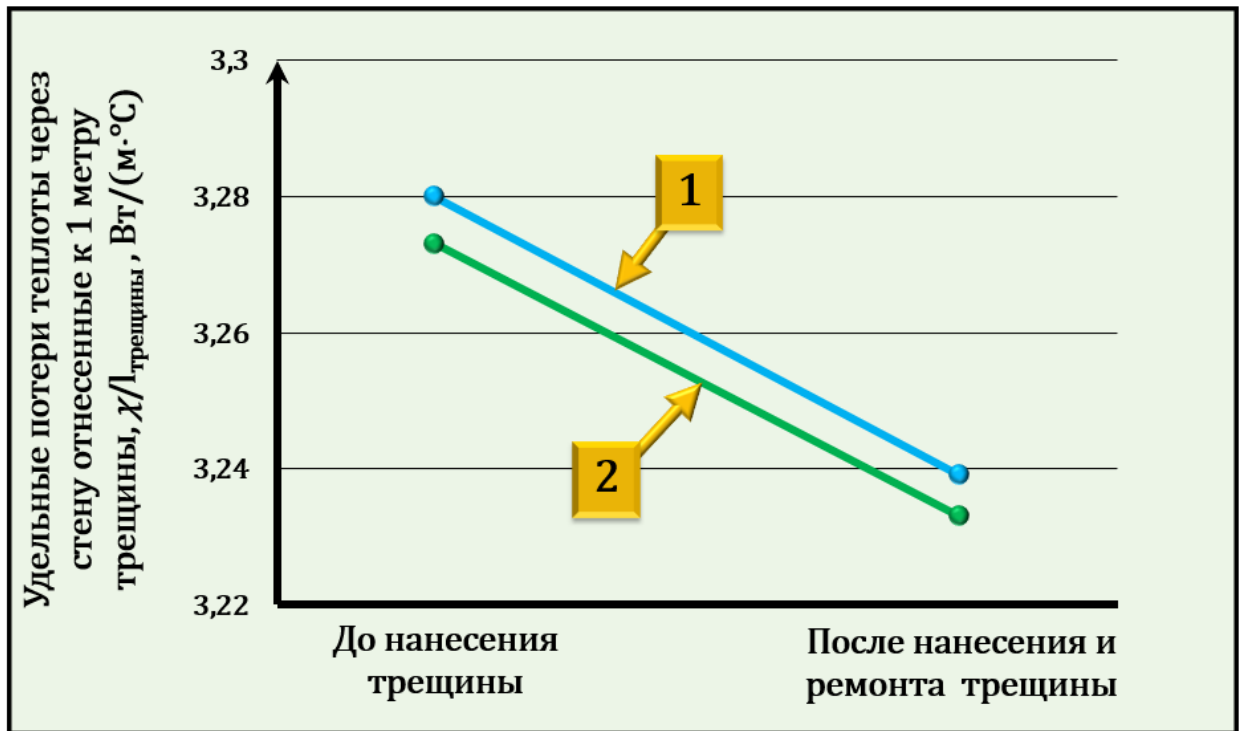


Рисунок 4.9. Сравнение удельных потерь теплоты через стену из железобетона толщиной 0,3 м, отнесенных к 1 метру трещины до нанесения и после нанесения и ремонта трещины (1 – по результатам экспериментального исследования; 2 – по результатам математического моделирования).

Также было сравнено значения удельных потерь теплоты через трещину $\psi_{\text{трещины}}$, полученную по результатам экспериментального исследования и по результатам математического моделирования (таблица 4.4).

Представлена величина $\psi_{\text{трещины}}$ по результатам экспериментального исследования и по результатам математического моделирования для стены из блоков из пенобетона толщиной 0,2 м (рисунок 4.10).

Значение $\psi_{\text{трещины}}$ по результатам эксперимента $0,096 \pm 0,0004 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{С})$, по результатам математического моделирования $0,094 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{С})$. Разница составляет 2,1 %.

Таблица 4.4. Величина $\psi_{\text{трещины}}$ по результатам экспериментального исследования и по результатам математического моделирования

№	Вариант стены здания	Удельные потери теплоты через трещину стены здания $\psi_{\text{трещины}}$, Вт/(м·°С)		Разница, %
		По результатам экспериментального исследования	По результатам математического моделирования	
1	Стена из кладки из блоков из пенобетона	0,096±0,0004	0,094	2,1
2	Стена из кладки из кирпича	0,052±0,0005	0,05	3,8
3	Стена из железобетона	-0,041±0,0006	-0,04	2,4

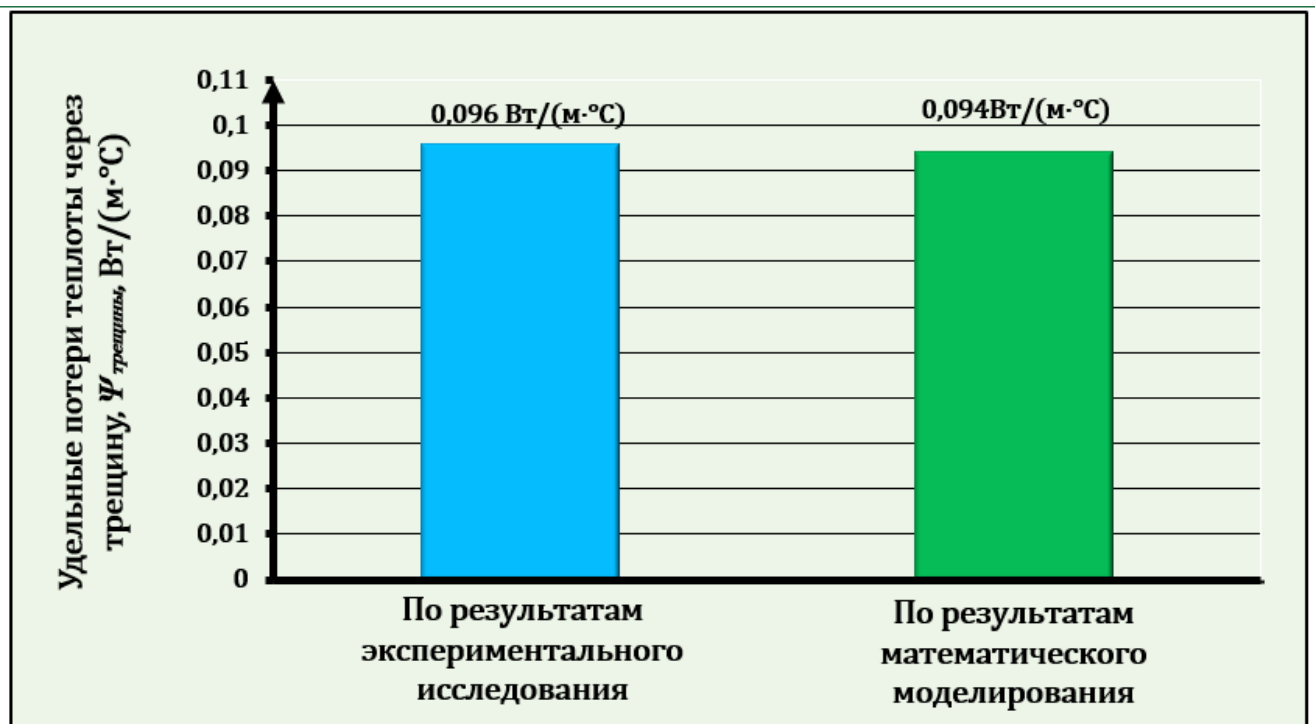


Рисунок 4.10. Величина $\psi_{\text{трещины}}$ по результатам экспериментального исследования и по результатам математического моделирования для стены из блоков из пенобетона.

Представлена величина $\psi_{\text{трещины}}$ по результатам экспериментального исследования и по результатам математического моделирования для стены из кладки из кирпича толщиной 0,38 м (рисунок 4.11).

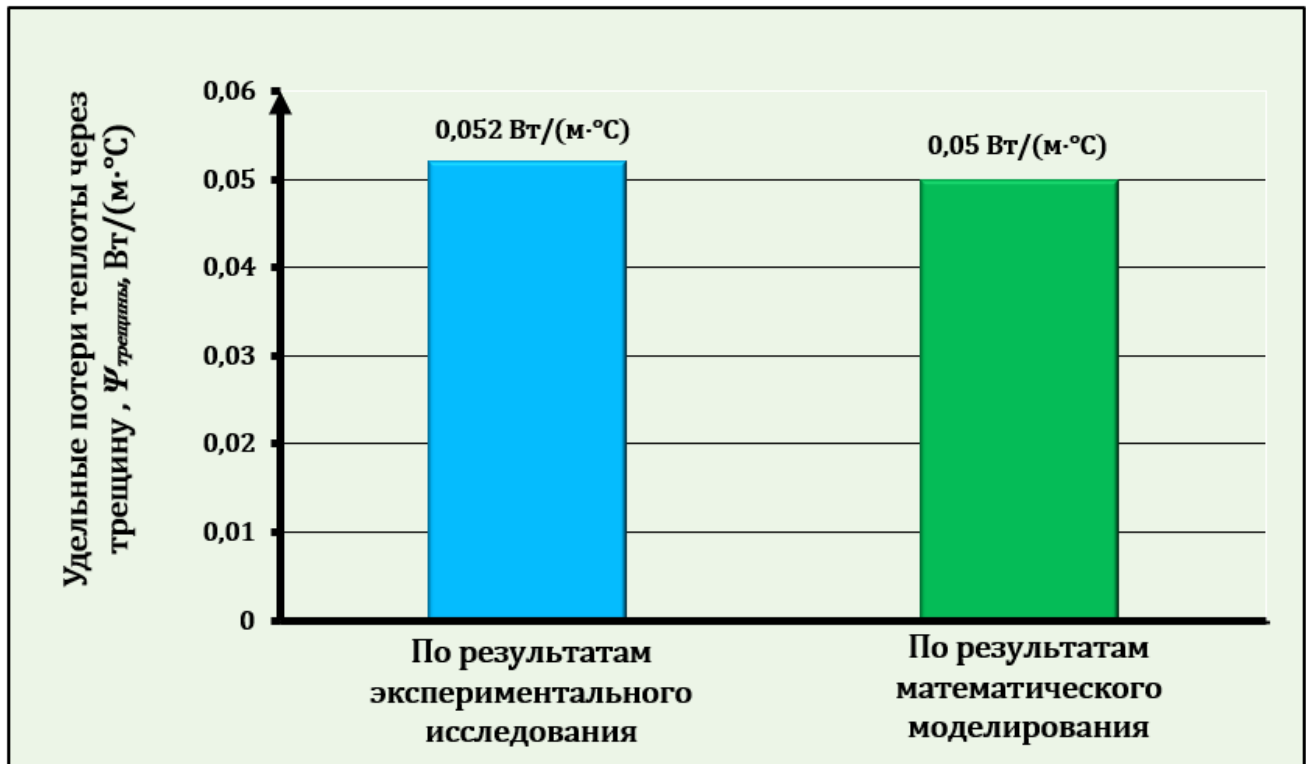


Рисунок 4.11. Величина $\psi_{\text{трещины}}$ по результатам экспериментального исследования и по результатам математического моделирования для стены из кладки из кирпича толщиной 0,38 м.

Значение $\psi_{\text{трещины}}$ по результатам эксперимента $0,052 \pm 0,0005$ Вт/(м·°C), по результатам математического моделирования 0,05 Вт/(м·°C). Разница составляет 3,8 %.

Представлено сравнение удельных потерь теплоты через трещину стены здания из железобетона толщиной 0,3 м по результатам экспериментального исследования и по результатам математического моделирования (рисунок 4.12).

Значение $\psi_{\text{трещины}}$ по результатам эксперимента $-0,041 \pm 0,0006 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$, по результатам математического моделирования $-0,04 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$. Разница составляет 2,4 %.

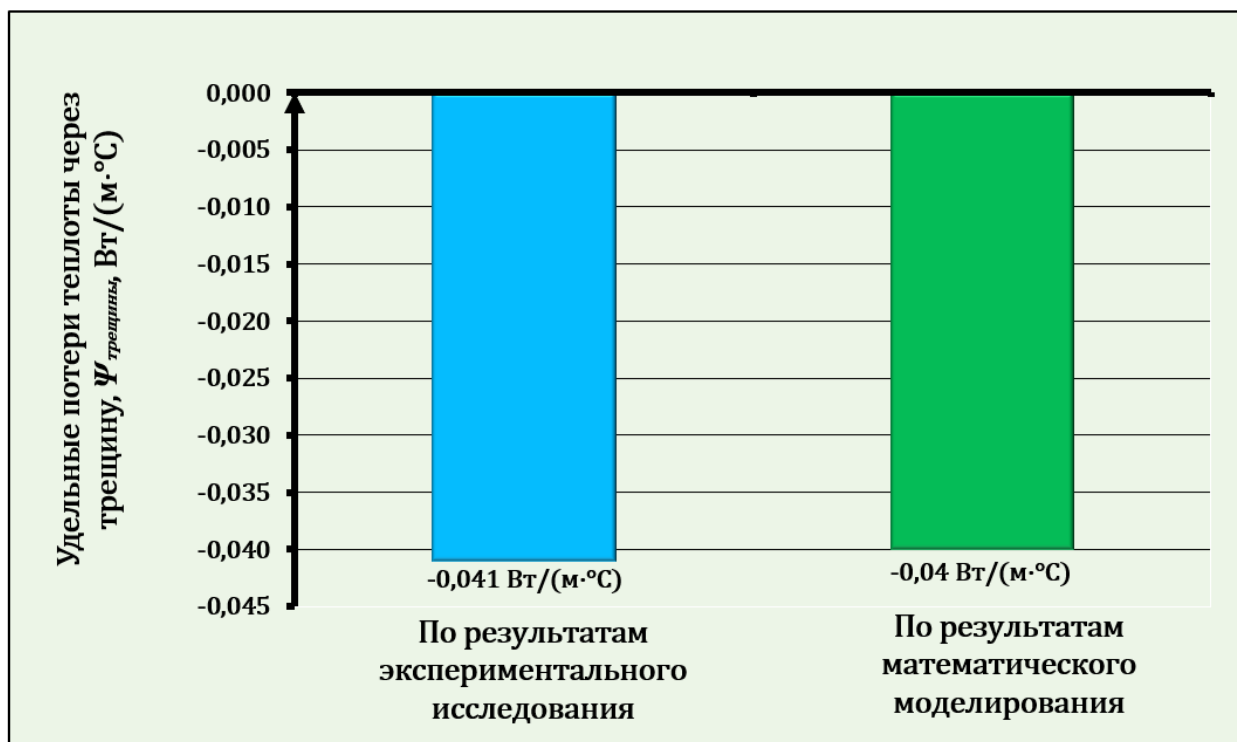


Рисунок 4.12. Сравнение удельных потерь теплоты через трещину стены здания из кладки из железобетона толщиной 0,3 м по результатам экспериментального исследования и по результатам математического моделирования.

Результаты экспериментального определения величины удельных потерь теплоты через трещину стены здания показывают высокую сходимость с результатами математического моделирования стены здания с трещиной для стен с основанием из пенобетона, кирпича и железобетона. Таким образом, проведенные эксперименты подтверждают результаты расчетов.

4.6. Выводы по главе 4

Проведены лабораторные эксперименты по измерению удельных потоков теплоты через стеновые ограждающие конструкции при наличии трещин для

верификации результатов математического моделирования температурного поля стены здания с трещинами, заполненными инъекционным раствором. В качестве материалов основания ограждающих конструкций были использованы пенобетон, кирпич и железобетон. Эксперименты проводились с использованием поверенного лабораторного оборудования.

Разработано экспериментальное устройство для определения удельных потерь теплоты, вызванных трещинами стен зданий. Испытания проводятся в два этапа. На первом этапе проводится эксперимента на образце стены здания без трещины. На втором этапе испытания повторяются на этом же образце стены здания, но уже с нанесенной трещиной, заполненной инъекционным раствором. Представлено описание проведения и обработки результатов экспериментального исследования. Приведены необходимые формулы.

Было проведено 60 экспериментов на стенах зданий с трещинами и без трещин с разным основанием ограждающей конструкции (пенобетон, кирпич, железобетон).

По результатам экспериментов получено, что для образца стены из кладки из блоков из пенобетона величина $\chi / l_{\text{трещины}}$ после нанесения и ремонта трещины статистически значимо увеличилась с $0,697 \pm 0,0004 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$ до $0,793 \pm 0,0004 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$ ($p < 0,05$). Для образца стены из кладки из кирпича величина $\chi / l_{\text{трещины}}$ после нанесения и ремонта трещины статистически значимо увеличилась с $1,611 \pm 0,0004 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$ до $1,663 \pm 0,0003 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$ ($p < 0,05$). Для образца стены из кладки из кирпича величина $\chi / l_{\text{трещины}}$ после нанесения и ремонта трещины статистически значимо уменьшилась с $3,28 \pm 0,0004 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$ до $3,239 \pm 0,0003 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$ ($p < 0,05$).

Был сделан вывод об успешном подтверждении результатов математического моделирования температурного поля стен зданий с трещинами, заполненными инъекционным раствором, экспериментальными исследованиями.

ГЛАВА 5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИВЕДЕННОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧЕ СТЕН ЗДАНИЙ ПОСЛЕ ПРОВЕДЕНИЯ РЕМОНТА ТРЕЩИН С ПРИМЕНЕНИЕМ ИНЪЕКЦИОННОГО РАСТВОРА

Приведенное сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций стен зданий определяется на стадии проектирования. Трещины, заполненные инъекционным раствором, и установленные инъекционные пакеры являются теплотехническими неоднородностями. Трещины и пакеры влияют на приведенное сопротивление теплопередаче стен зданий, но не учитываются при проектировании нового здания. Возможность учета отремонтированных трещин появляется при реконструкции и капитальном ремонте здания. Настоящая глава посвящена оценке влияния трещин в стенах на теплозащитную оболочку здания.

5.1. Разработка уточненной формулы для определения сопротивления теплопередаче стен зданий с учетом отремонтированных трещин и установленных пакеров

Расчет приведенного сопротивления теплопередаче стен зданий регламентируется двумя нормативными документами СП [80] и СП [78].

В процессе строительства и эксплуатации здания, возможно образование трещин стен здания, которые будут устраняться при ремонте инъектированием. Это приведет к изменению значения приведенного сопротивления теплопередаче.

Предложена уточненная формула для определения приведенного сопротивления теплопередаче стен зданий с учетом отремонтированных трещин и установленных пакеров:

$$R_{0y}^{PP} = \frac{1}{\frac{1}{R_{0n}^{PP}} + \sum l_{тр.i} \cdot \psi_{тр.i} + \sum n_{пак.k} \cdot \chi_{пак.k}}. \quad (5.1)$$

где

$R_{0y}^{ПП}$ – уточненное значение приведенного сопротивления теплопередаче стены здания с учетом трещин и пакеров, заполненных инъекционным раствором, $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$;

$R_{0н}^{ПП}$ – приведенное сопротивление теплопередаче стены здания без учета трещин и пакеров, заполненных инъекционным раствором, $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$;

$l_{тр.i}$ – длина трещины i -го вида, приходящаяся на 1 м^2 стены здания, $\text{м}/\text{м}^2$;

$\psi_{тр.i}$ – удельные потери теплоты, проходящие через 1 м трещины i -го вида, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$;

$n_{пак.k}$ – количество пакеров k -го вида, приходящихся на 1 м^2 стены здания, $1/\text{м}^2$;

$\chi_{пак.k}$ – удельные потери теплоты, проходящие через пакер k -го вида, $\text{Вт}/^\circ\text{C}$;

Величина $l_{тр.i}$ может быть определена по формуле:

$$l_{тр.i} = \frac{l_{трещины.i}}{S_{стены}}. \quad (5.2)$$

где

$l_{трещины.i}$ – длина трещины i -го вида, м .

$S_{стены}$ – площадь стены здания, м^2 .

Величина $n_{пак.k}$ может быть определена по формуле:

$$n_{пак.k} = \frac{N_{пак.k}}{S_{стены}}. \quad (5.3)$$

где

$N_{пак.k}$ – количество пакеров k -го вида.

Формулы (5.1) – (5.3) могут применяться для оценки приведенного сопротивления теплопередаче здания с отремонтированными трещинами и установленными пакерами.

Если стена здания имеет несколько различных типов трещин, при ремонте которых применяются разные пакеры, то в знаменатель формулы (5.1) необходимо

ввести члены, которые учитывают удельные потоки теплоты от каждого типа трещин и пакеров. Трещины считаются различными если имеют разную глубину или ширину раскрытия. Пакеры считаются различными, если имеют разный диаметр или глубину установки.

Представлена принципиальная схема развертки стены здания с нанесенными на неё двумя типами трещин и с двумя разными типами пакеров (рисунок 5.1).

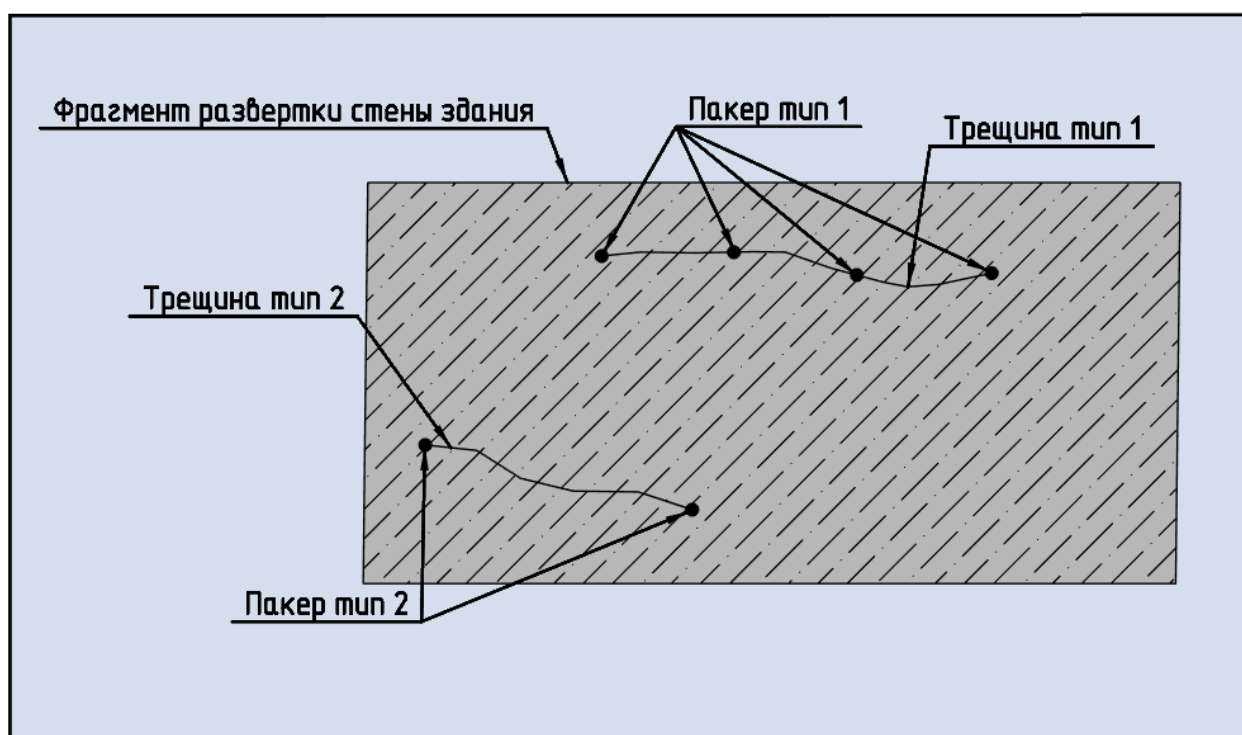


Рисунок 5.1. Принципиальная схема развертки стены здания с нанесенными на неё двумя типами трещин и с двумя разными типами пакеров.

Для представленной на рисунке 5.1 схемы стены здания уравнение (5.1) запишется в виде:

$$R_{0y}^{PP} = \frac{1}{\frac{1}{R_{0n}^{PP}} + l_{тр.1} \cdot \psi_{тр.1} + l_{тр.2} \cdot \psi_{тр.2} + n_{пак.1} \cdot \chi_{пак.1} + n_{пак.2} \cdot \chi_{пак.2}}. \quad (5.4)$$

где

$l_{тр.1}$ – длина трещины 1-го вида, приходящаяся на 1 м² стены здания, м/м²;

$l_{тр.2}$ – длина трещины 2-го вида, приходящаяся на 1 м² стены здания, м/м²;

$\psi_{тр.1}$ – удельные потери теплоты, проходящие через 1 м трещины 1-го вида, Вт/(м·°C);

$\psi_{тр.2}$ – удельные потери теплоты, проходящие через 1 м трещины 2-го вида, Вт/(м·°C);

$n_{пак.1}$ – количество пакеров 1-го вида, приходящихся на 1 м² стены здания, 1/м²;

$n_{пак.2}$ – количество пакеров 2-го вида, приходящихся на 1 м² стены здания, 1/м²;

$\chi_{пак.1}$ – удельные потери теплоты, проходящие через пакер 1-го вида, Вт/°C;

$\chi_{пак.2}$ – удельные потери теплоты, проходящие через пакер 2-го вида, Вт/°C.

Величины $l_{тр.1}$ и $l_{тр.2}$ могут быть определены по формуле (5.2):

$$l_{тр.1} = \frac{l_{трещины.1}}{S_{стены}}. \quad (5.5)$$

где

$l_{трещины.1}$ – длина трещины 1-го вида, м.

$$l_{тр.2} = \frac{l_{трещины.2}}{S_{стены}}. \quad (5.6)$$

где $l_{трещины.2}$ – длина трещины 2-го вида, м.

Величины $n_{пак.1}$ и $n_{пак.2}$ могут быть определены по формуле (5.3):

$$n_{пак.1} = \frac{N_{пак.1}}{S_{стены}}. \quad (5.7)$$

где

$N_{пак.1}$ – количество пакеров 1-го вида.

$$n_{пак.2} = \frac{N_{пак.2}}{S_{стены}}. \quad (5.8)$$

где $N_{пак.2}$ – количество пакеров 2-го вида.

5.2. Оценка необходимости утепления неутепленной стены здания в связи с ремонтом образовавшихся трещин

Рассмотрим коттеджный дом в городе Оренбург с однослойной стеной из пенобетонных блоков. Основание оштукатурено с двух сторон.

Представлена конструкция стены коттеджного дома (таблица 5.1).

Таблица 5.1. Конструкция стены коттеджного дома

№	Название слоя стены	Толщина, м	Теплопроводность, Вт/(м·°C)
1	Наружная штукатурка	0,005	0,76
2	Кладка из блоков из пенобетона	0,6	0,14
3	Внутренняя штукатурка	0,02	0,76

Для климатических условий строительства требуемое сопротивление теплопередаче составило $3,12 \text{ (м}^2\cdot\text{°C)/Вт}$. Стена здания имеет три типа линейных теплотехнических неоднородностей. Удельные геометрические показатели составляют для стены $1 \text{ м}^2/\text{м}^2$, для стыков с оконными блоками $0,296 \text{ м}/\text{м}^2$, для примыкания к цокольному ограждению $0,185 \text{ м}/\text{м}^2$, для углов здания $0,148 \text{ м}/\text{м}^2$, для швов кладки $2 \text{ 1}/\text{м}^2$. Удельные потери теплоты составляют для стены $0,223 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{°C})$, для стыков с оконными блоками $0,1 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{°C})$, для примыкания к цокольному ограждению $0,167 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{°C})$, для углов здания $0,092 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{°C})$, для швов кладки $0,002 \text{ Вт}/\text{°C}$. Удельный поток теплоты через элемент составил для стены $0,223 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{°C})$, для стыков с оконными блоками $0,03 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{°C})$, для примыкания к цокольному ограждению $0,031 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{°C})$, для углов здания $0,014 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{°C})$, для швов кладки $0,004 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{°C})$. Суммарный удельный поток теплоты через все элементы стены здания равен $0,302 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{°C})$.

Представлены удельные потоки теплоты для элементов стены коттеджного дома с учетом трещин и пакеров, заполненных инъекционным раствором (таблица 5.2).

Таблица 5.2. Удельные потоки теплоты для элементов стены коттеджного дома с учетом трещин и пакеров, заполненных инъекционным раствором

Тип неоднородности	Элемент	Название элемента	Удельный геометрический показатель	Удельный потери теплоты	Удельный поток теплоты через элемент, Вт/(м ² ·°C)	Доля общего потока теплоты, через фрагмент, %
Теплотехнические неоднородности в соответствии с СП 230.13330.2015 «Конструкции ограждающие. Характеристики теплотехнических однородностей» [78]	Плоский	Стена	1 м ² /м ²	0,223 Вт/(м ² ·°C)	0,223	66,57
	Линейный	Стыки с оконными блоками	0,296 м/м ²	0,1 Вт/(м·°C)	0,03	8,96
		Примыкание к цокольному ограждению	0,185 м/м ²	0,167 Вт/(м·°C)	0,031	9,25
		Углы здания	0,148 м/м ²	0,092 Вт/(м·°C)	0,014	4,18
	Точечный	Шов кладки	2 1/м ²	0,002 Вт/°C	0,004	1,19
Предложенные теплотехнические неоднородности	Линейный	Трещины, заполненные инъекционным раствором	0,3 м/м ²	0,05 Вт/(м·°C)	0,015	4,48
	Точечный	Пакеры, заполненные инъекционным раствором	0,9 1/м ²	0,02 Вт/°C	0,018	5,37
Итого:					0,335	100

Представлены значения сопротивлений теплопередаче, вычисленные для стены рассматриваемого коттеджного дома (рисунок 5.2).

Из рисунка 5.2 видно, что снижение приведенного сопротивления теплопередаче из-за влияния трещин и пакеров, заполненных инъекционным раствором, составило 9,7 %.

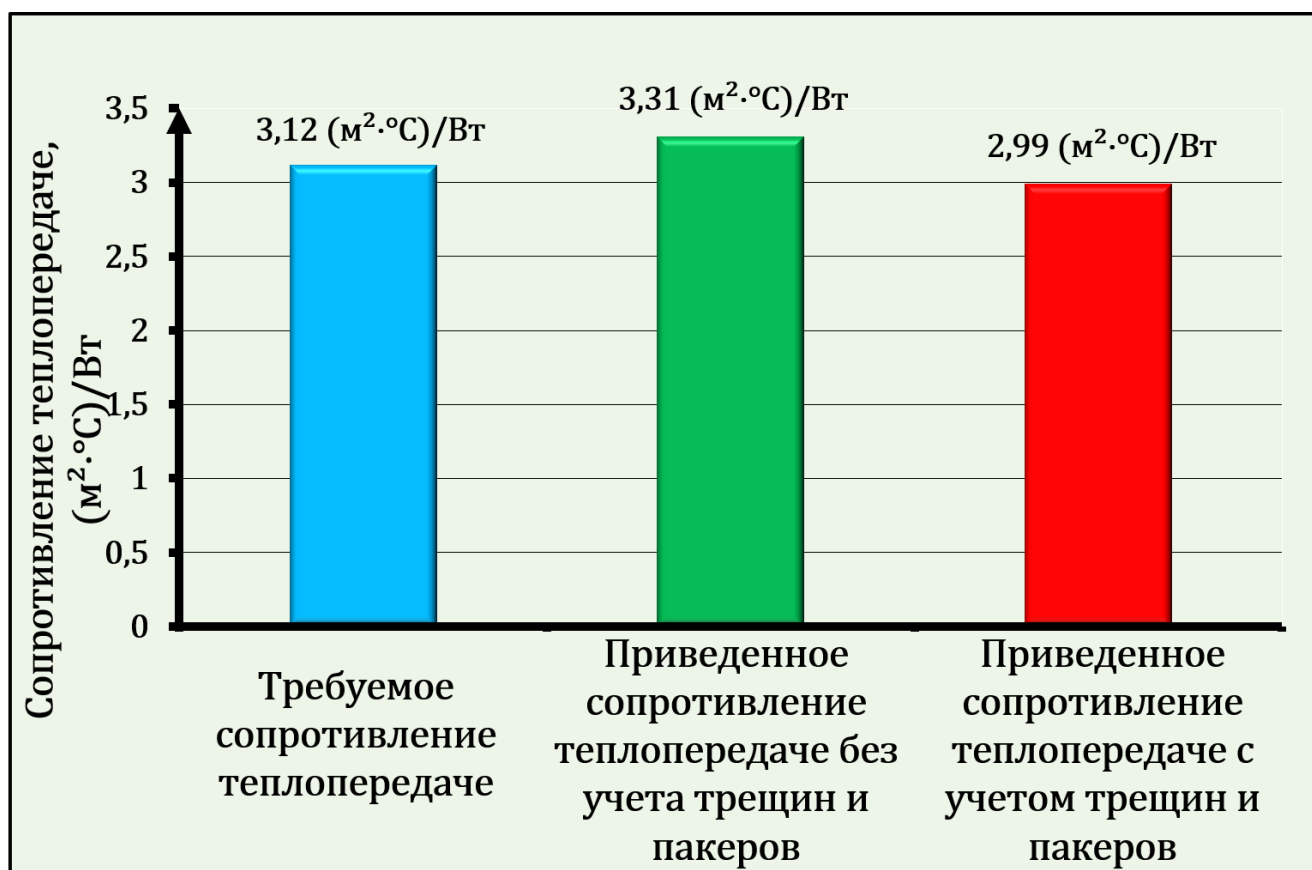


Рисунок 5.2. Значения сопротивлений теплопередаче, вычисленные для стены рассматриваемого коттеджного дома.

После появления в стене трещин и проведения их инъектирования добавились ещё 2 теплотехнические неоднородности: трещины, заполненные инъекционным раствором (линейные теплотехнические неоднородности), пакеры, заполненные инъекционным раствором (точечные теплотехнические неоднородности).

Удельные геометрические показатели составляют для трещин, заполненных инъекционным раствором, $0,3 \text{ м/м}^2$, для пакеров, заполненных инъекционным раствором, $0,9 \text{ л/м}^2$.

Удельные потери теплоты составляют для трещин, заполненных инъекционным раствором, $0,05 \text{ Вт/(м} \cdot ^\circ\text{С)}$, для пакеров, заполненных инъекционным раствором, $0,02 \text{ Вт/}^\circ\text{С}$.

Доля общего потока теплоты, через различные фрагменты ограждающей конструкции составляют для стены здания $66,57 \%$, для стыков с оконными

блоками 8,96 %, для примыкания к цокольному ограждению 9,25%, для углов здания 4,18 %, для швов кладки 1,19 %, для трещин, заполненных инъекционным раствором, 4,48 % для пакеров, заполненных инъекционным раствором, 5,37 %.

Представлены доли общего потока теплоты через различные фрагменты ограждающей конструкции стены здания (рисунок 5.3).

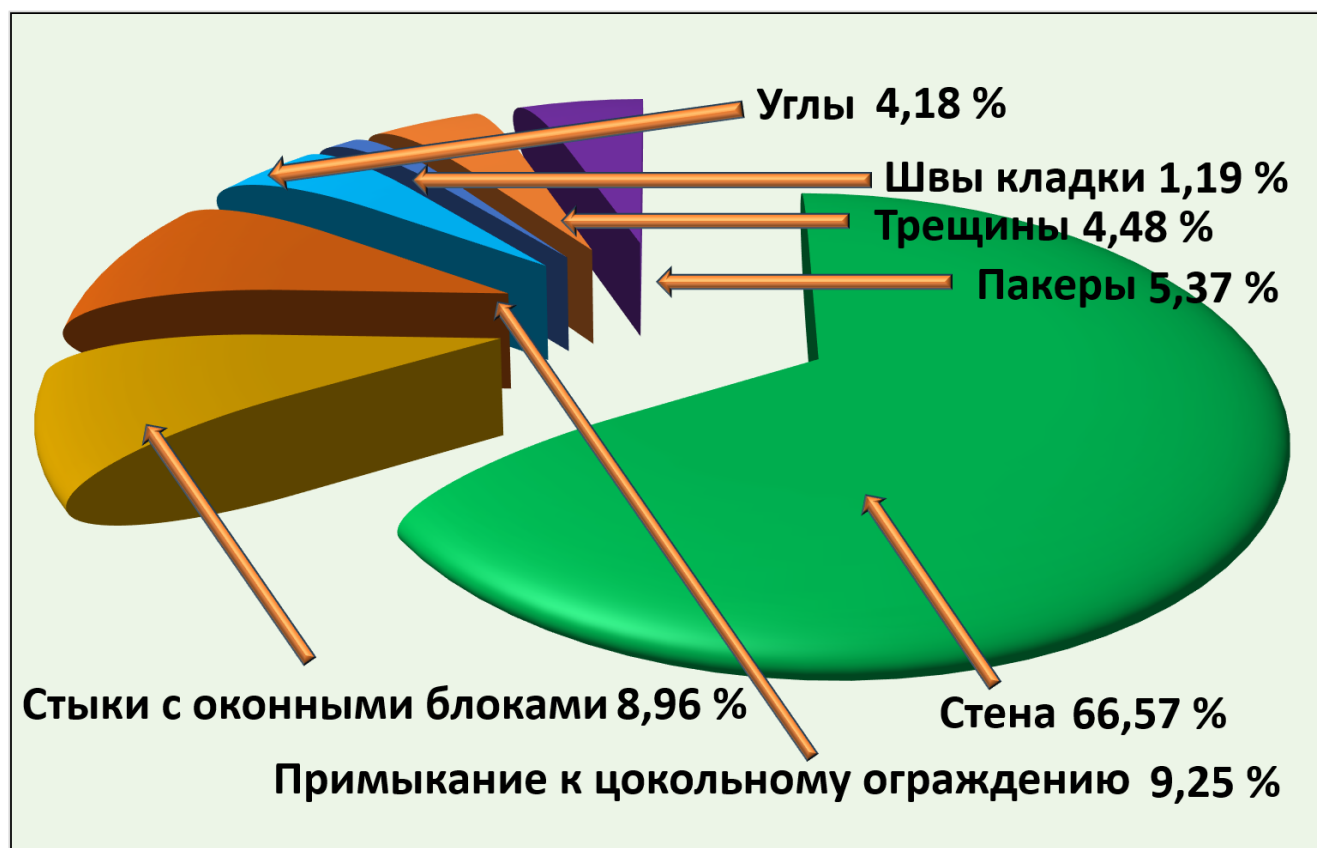


Рисунок 5.3. Доли общего потока теплоты через различные фрагменты ограждающей конструкции стены здания.

Из рисунка 5.3 видно, что 66,57 % теплоты уходит через гладь стены, 23,58 % теплоты уходит через теплотехнические неоднородности без учета трещин и пакеров и 9,85 % теплоты уходит через трещины и пакеры, заполненные инъекционным раствором.

Представлены доли общего потока теплоты через гладь стены, через теплотехнические неоднородности без учета трещин и пакеров и через трещины и пакеры, заполненные инъекционным раствором. (рисунок 5.4).

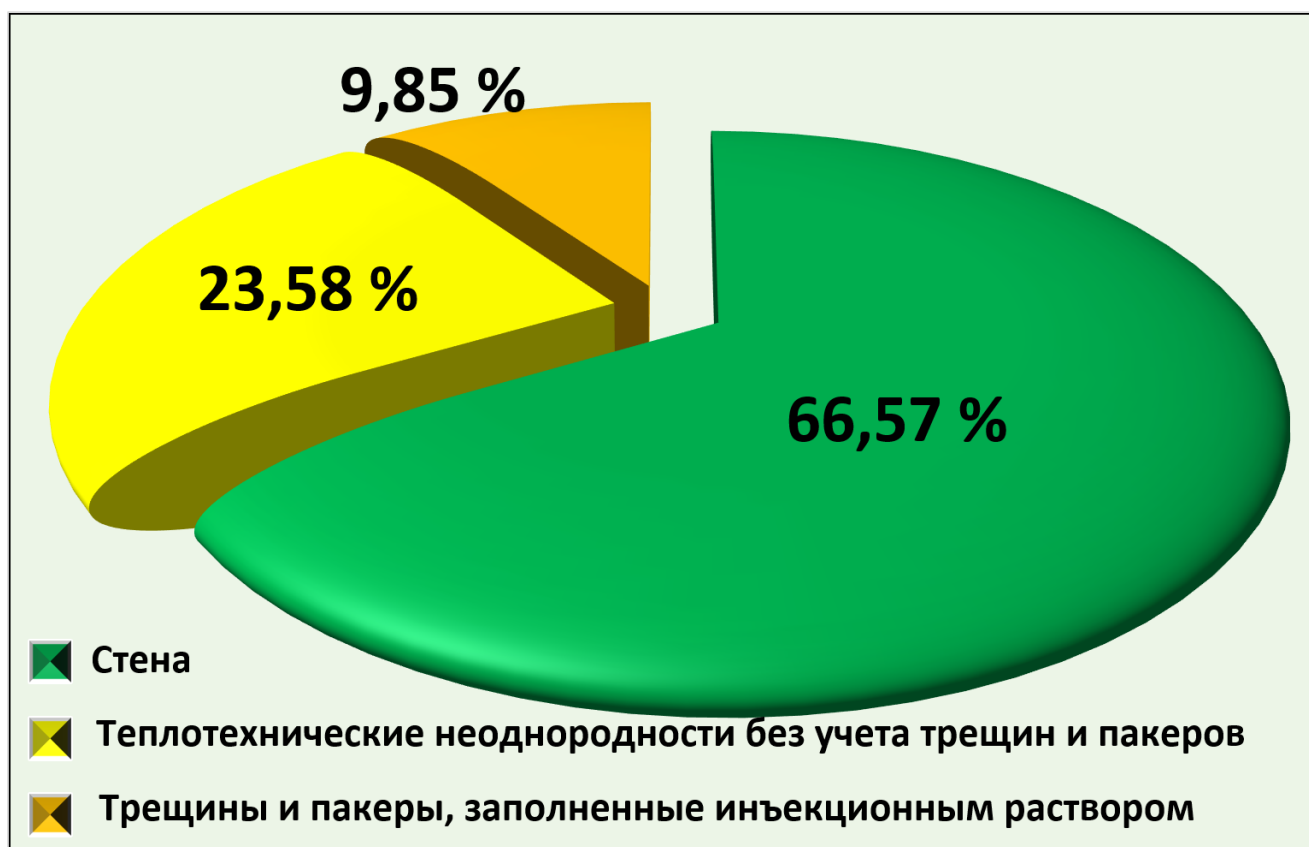


Рисунок 5.4. Доли общего потока теплоты через гладь стены, через теплотехнические неоднородности без учета трещин и пакеров и через трещины и пакеры, заполненные инъекционным раствором.

5.3. Оценка необходимости увеличения толщины слоя утеплителя стены здания в связи с ремонтом образовавшихся трещин

Рассмотрим здание школы в поселке Ватутинки (Московская область) со стеной из кладки из блоков из пенобетона, утепленной минеральной ватой. Стена оштукатурена с двух сторон. Представлена конструкция стены здания дома культуры (таблица 5.3). Для климатических условий строительства требуемое сопротивление теплопередаче составило $2,93 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C) / Вт}$. Стена здания имеет три типа линейных теплотехнических неоднородностей (стыки с оконными блоками, примыкание к цокольному ограждению, углы здания) и один тип точечной теплотехнической неоднородности (тарельчатый анкер).

Таблица 5.3. Конструкция стены здания школы

№	Название слоя стены	Толщина, м	Теплопроводность, Вт/(м·°С)
1	Наружная штукатурка	0,005	0,93
2	Утеплитель из минеральной ваты	0,1	0,04
3	Кладка из блоков из пенобетона	0,2	0,15
4	Внутренняя штукатурка	0,02	0,93

Представлен фрагмент плана здания школы (рисунок 5.5).

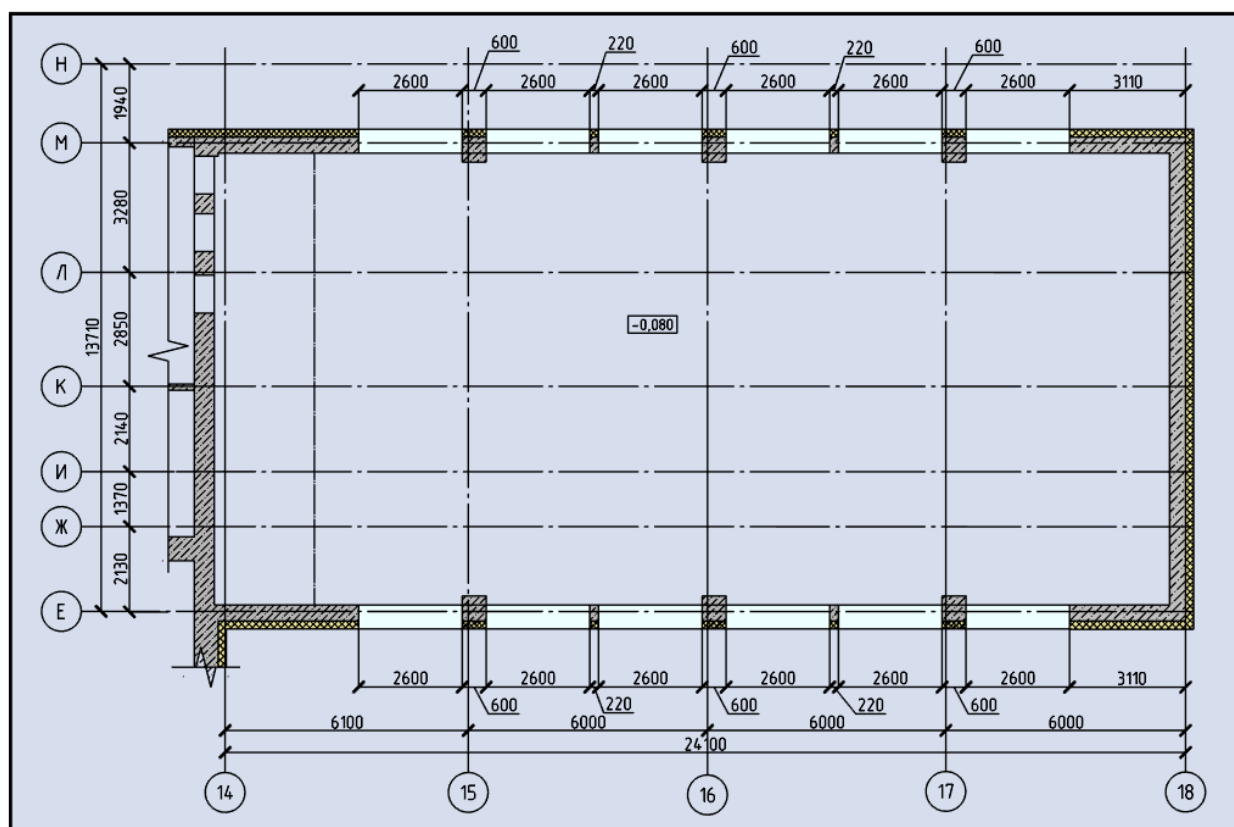


Рисунок 5.5. Фрагмент плана здания школы (спортивный зал).

Представлен фрагмент развертки здания школы (рисунок 5.6).

Удельные геометрические показатели составляют для стены $1 \text{ м}^2/\text{м}^2$, для стыков с оконными блоками $0,274 \text{ м}^2/\text{м}^2$, для примыкания к цокольному ограждению $0,169 \text{ м}^2/\text{м}^2$, для углов здания $0,1 \text{ м}^2/\text{м}^2$, для тарельчатого анкера $5 \text{ л}/\text{м}^2$.

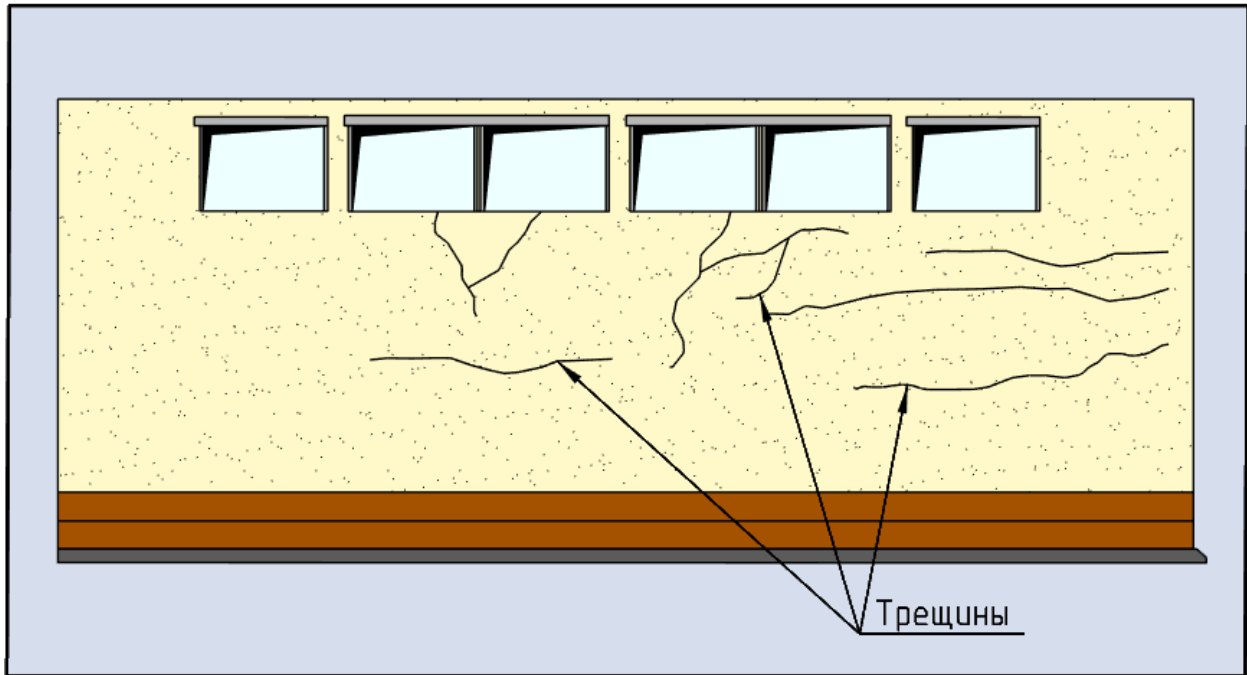


Рисунок 5.6. Фрагмент развертки стены здания школы с нанесенными трещинами (спортивный зал).

Удельные потери теплоты составляют для стены $0,246 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, для стыков с оконными блоками $0,13 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$, для примыкания к цокольному ограждению $0,157 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$, для углов здания $0,08 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$, для тарельчатого анкера $0,002 \text{ Вт}/^\circ\text{C}$.

Удельный поток теплоты через элемент составил для стены $0,246 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, для стыков с оконными блоками $0,036 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, для примыкания к цокольному ограждению $0,027 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, для углов здания $0,008 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, для тарельчатых анкеров $0,008 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$. Суммарный удельный поток теплоты через все элементы стены здания равен $0,327 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$.

После появления в стене сквозных трещин при ширине раскрытия 8 мм и проведения их инъектирования с помощью пакеров диаметром 16 мм добавились ещё 2 теплотехнические неоднородности: трещины, заполненные инъекционным раствором (линейные теплотехнические неоднородности), пакеры, заполненные инъекционным раствором (точечные теплотехнические неоднородности).

Представлено определение с использованием номограммы удельных потерь теплоты через трещины в стенах зданий, заполненных инъекционным раствором,

для стены из блоков из пенобетона толщиной 0,2 м с утеплителем толщиной 0,1 м при ширине раскрытия трещины 8 мм и глубине 200 мм (рисунок 5.7.)



Рисунок 5.7. Определение с использованием номограммы удельных потерь теплоты через трещины в стенах зданий, заполненных инъекционным раствором, для стены из блоков из пенобетона толщиной 0,2 м с утеплителем толщиной 0,1 м при ширине раскрытия трещины 8 мм и глубине 200 мм (цифрами обозначены варианты глубины трещины: 1 – 1 мм; 2 – 5 мм; 3 – 10 мм; 4 – 50 мм; 5 – 100 мм; 6 – 150 мм; 7 – 200 мм).

Удельные геометрические показатели составляют для трещин, заполненных инъекционным раствором, 0,7 м/м², для пакеров, заполненных инъекционным раствором, 3,5 1/м².

Удельные потери теплоты составляют для трещин и пакеров определялись с помощью номограмм, разработанных в настоящем исследовании. Номограммы для трещин представлены в главе 2 диссертации, номограммы для пакеров представлены в главе 3 диссертации.

Удельные потери теплоты для трещины, заполненной инъекционным раствором, при ширине раскрытия трещины 8 мм и глубине 200 мм составили 0,012 Вт/(м·°C).

Представлено определение с использованием номограммы удельных потерь теплоты через установленные в стенах зданий пакеры, заполненные инъекционным раствором, для стен из блоков из пенобетона толщиной 0,2 м с утеплителем толщиной 0,1 м для пакера диаметром 16 мм при глубине установки пакера 130 мм (рисунок 5.8).

Удельные потери теплоты для пакера, заполненного инъекционным раствором, при диаметре пакера 16 мм и глубине установки 130 мм составили 0,005 Вт/°C.

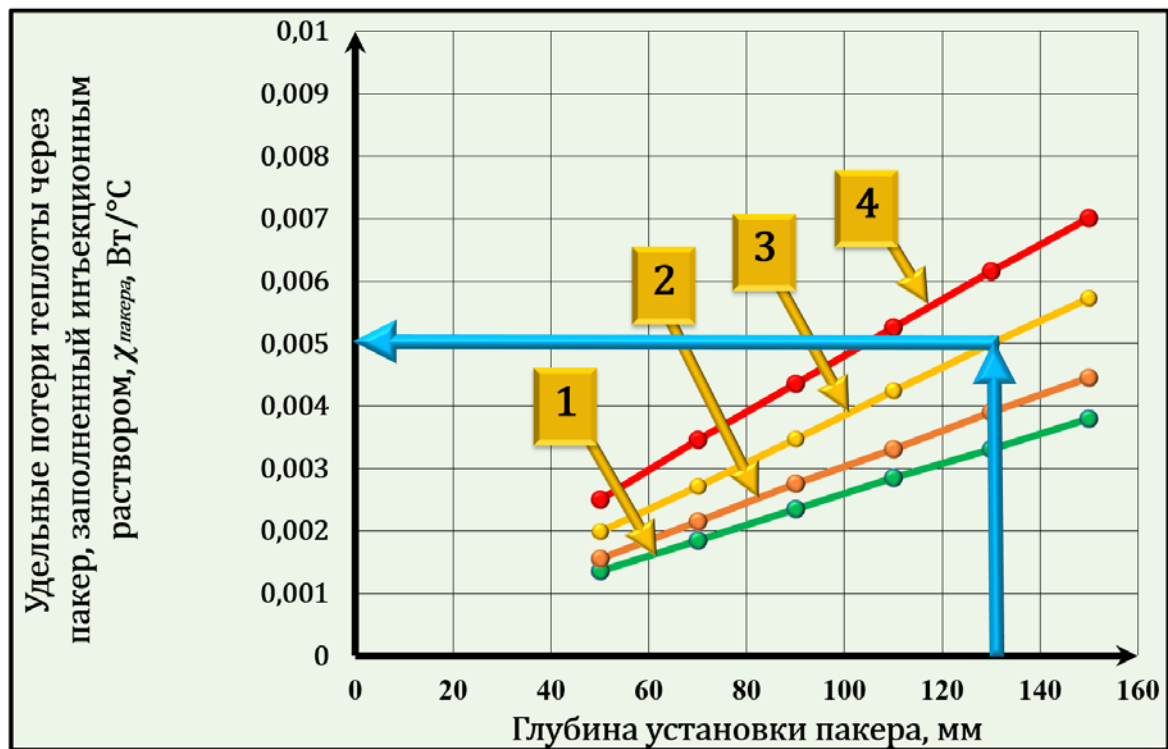


Рисунок 5.8. Определение с использованием номограммы удельных потерь теплоты через установленные в стенах зданий пакеры, заполненные инъекционным раствором, для стен из блоков из пенобетона толщиной 0,2 м с утеплителем толщиной 0,1 м для пакера диаметром 16 мм при глубине установки пакера 130 мм (цифрами обозначены варианты диаметра пакера: 1 – 10 мм; 2 – 13 мм; 3 – 16; 4 – 18 мм).

Представлены удельные потоки теплоты для элементов стены здания школы с учетом трещин и пакеров, заполненных инъекционным раствором (таблица 5.4).

Таблица 5.4. Удельные потоки теплоты для элементов стены здания школы с учетом трещин и пакеров, заполненных инъекционным раствором

Тип неоднородности	Элемент	Название элемента	Удельный геометрический показатель	Удельный потери теплоты	Удельный поток теплоты через элемент, Вт/(м ² ·°C)	Доля общего потока теплоты, через фрагмент, %
Теплотехнические неоднородности в соответствии с СП 230.13330.2015 «Конструкции ограждающие. Характеристики теплотехнических однородностей» [78]	Плоский	Стена	1 м ² /м ²	0,246 Вт/(м ² ·°C)	0,246	69,7
	Линейный	Стыки с оконными блоками	0,274 м/м ²	0,13 Вт/(м·°C)	0,036	10,2
		Примыкание к цокольному ограждению	0,169 м/м ²	0,157 Вт/(м·°C)	0,027	7,6
		Углы здания	0,1 м/м ²	0,08 Вт/(м·°C)	0,008	2,3
	Точечный	Тарельчатый анкер	5 1/м ²	0,002 Вт/°C	0,01	2,8
Предложенные теплотехнические неоднородности	Линейный	Трещины, заполненные инъекционным раствором	0,7 м/м ²	0,012 Вт/(м·°C)	0,008	2,3
	Точечный	Пакеры, заполненные инъекционным раствором	3,5 1/м ²	0,005 Вт/°C	0,018	5,1
Итого:					0,353	100

Удельный поток теплоты через элемент составил для трещин, заполненных инъекционным раствором, 0,008 Вт/(м²·°C), для пакеров, заполненных

инъекционным раствором, $0,018 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$. Суммарный удельный поток теплоты через все элементы стены здания с учетом трещин и пакеров равен $0,353 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$.

Представлены значения сопротивлений теплопередаче, вычисленные для стены рассматриваемого здания школы (рисунок 5.9).

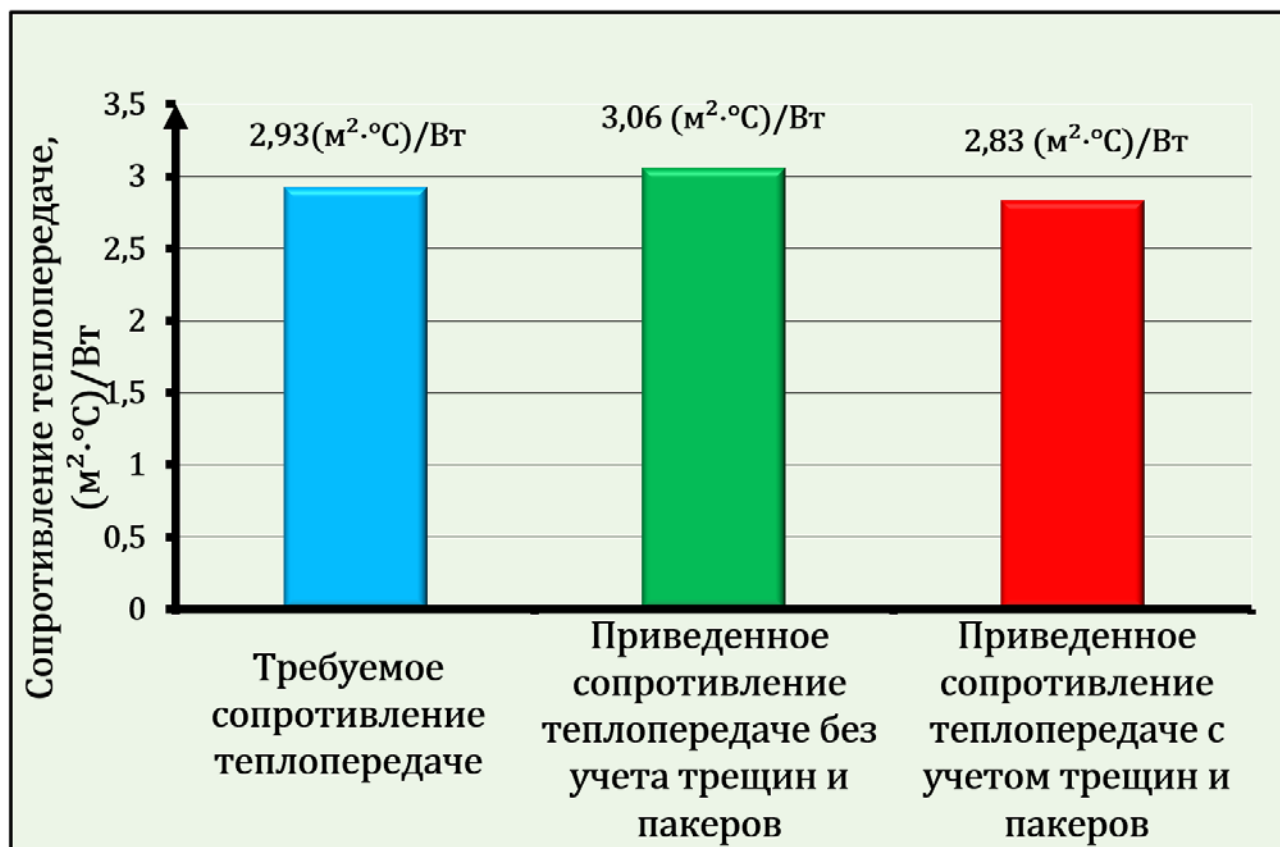


Рисунок 5.9. Значения сопротивлений теплопередаче, вычисленные для стены рассматриваемого здания школы.

Доля общего потока теплоты, через различные фрагменты ограждающей конструкции составляют для стены здания 69,7 %, для стыков с оконными блоками 10,2 %, для примыкания к цокольному ограждению 7,6 %, для углов здания 2,3 %, для тарельчатых анкеров 2,8 %, для трещин, заполненных инъекционным раствором, 2,3 % для пакеров, заполненных инъекционным раствором, 5,1 %.

Величина R_{0y}^{PP} составила $2,83 (\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})/\text{Вт}$. Данное значение ниже требуемого сопротивления теплопередаче, что не допускает строительство данной

ограждающей конструкции. Для выполнения норм по тепловой защите здания для рассматриваемой стены необходимо увеличение толщины слоя утеплителя. Повторный расчет значения приведенного сопротивления теплопередаче стены здания с учетом трещин и пакеров, заполненных инъекционным раствором.

Из рисунка 5.9 видно, что снижение приведенного сопротивления теплопередаче из-за влияния трещин и пакеров, заполненных инъекционным раствором, составило 7,5 %.

Представлены доли общего потока теплоты через различные фрагменты ограждающей конструкции стены здания (рисунок 5.10).

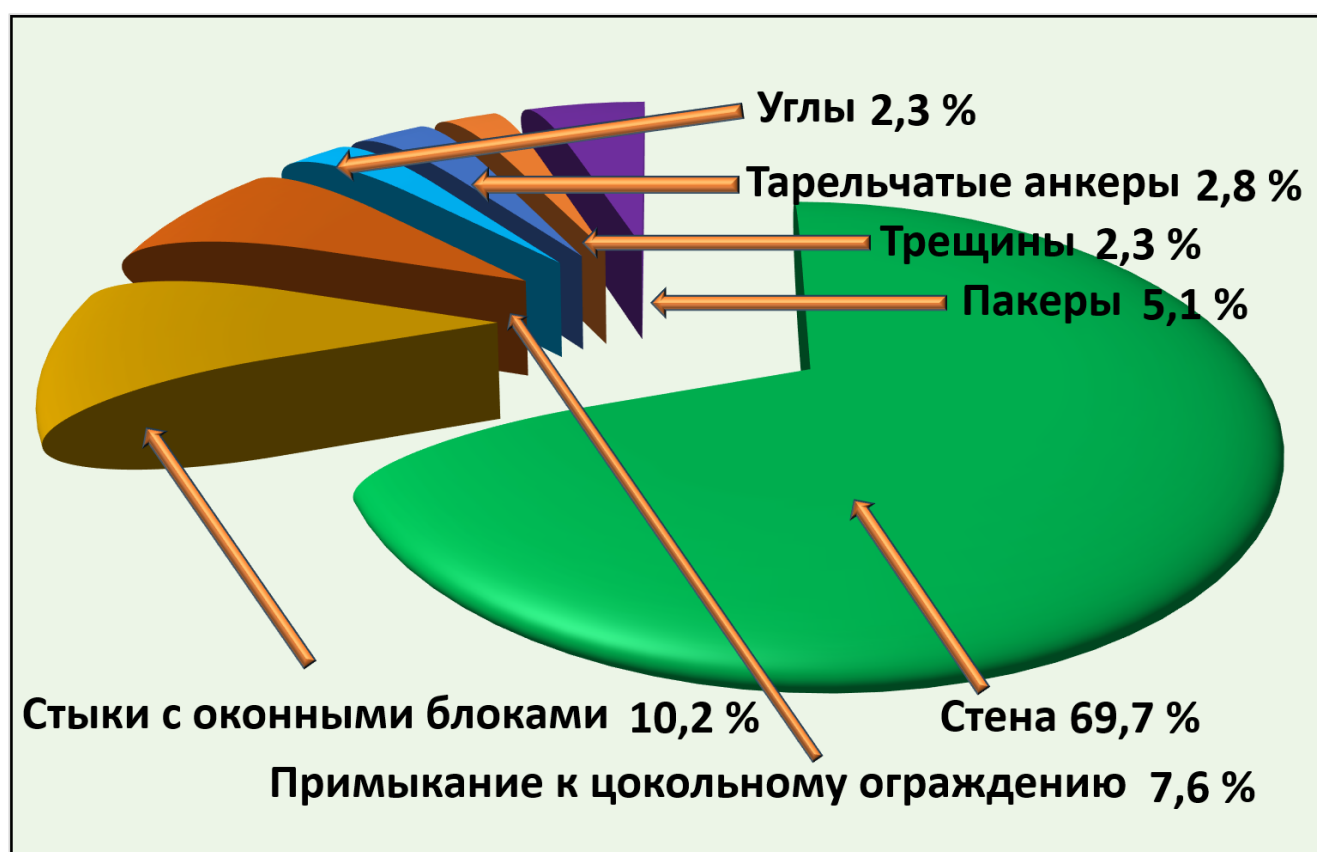


Рисунок 5.10. Доли общего потока теплоты через различные фрагменты ограждающей конструкции стены здания.

Из рисунка 5.10 видно, что 69,7 % теплоты уходит через гладь стены, 22,9 % теплоты уходит через теплотехнические неоднородности без учета трещин и пакеров и 7,4 % теплоты уходит через трещины и пакеры, заполненные инъекционным раствором.

Представлены доли общего потока теплоты через гладь стены, через теплотехнические неоднородности без учета трещин и пакеров и через трещины и пакеры, заполненные инъекционным раствором. (рисунок 5.11).

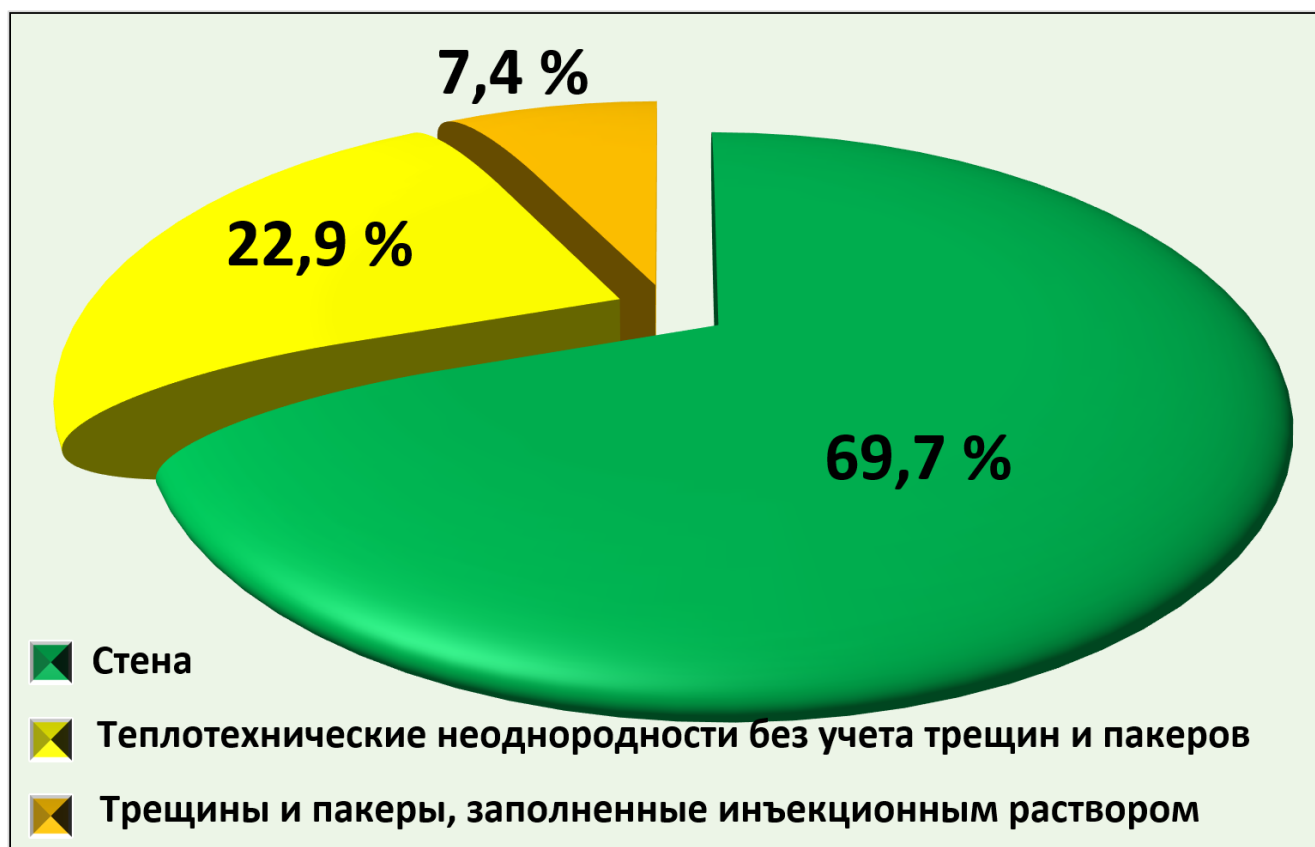


Рисунок 5.11. Доли общего потока теплоты через гладь стены, через теплотехнические неоднородности без учета трещин и пакеров и через трещины и пакеры, заполненные инъекционным раствором.

Таким образом, можно сделать вывод о значительном влиянии трещин и пакеров на приведенное сопротивление теплопередаче рассматриваемой стены здания.

Представленные примеры (рисунки 5.2 и 5.9) иллюстрируют возможность снижение сопротивления теплопередаче из-за трещин и пакеров, заполненных инъекционным раствором, ниже нормируемого уровня. В ряде случаев это может приводить к необходимости дополнительного утепления стены здания.

5.4. Алгоритм принятия решения о дополнительном утеплении стены здания после ремонта трещин с использованием инъекционного раствора

Как было показано в параграфах 5.2 и 5.3 появление трещин и последующие их устранение в процессе ремонта с помощью инъектирования может снизить приведенное сопротивление теплопередаче ниже требуемого значения. В этом случае здание не будет выполнять требования СП [80] по тепловой защите.

Для случая, если в однослойной стене приведенное сопротивление теплопередаче из-за влияния трещин и пакеров, заполненных инъекционным раствором, снизилось ниже требуемого значения следует утеплить стену

Для случая, если в многослойной ограждающей конструкции с утеплителем приведенное сопротивление теплопередаче из-за влияния трещин и пакеров, заполненных инъекционным раствором, снизилось ниже требуемого значения следует провести мероприятия по увеличению толщины слоя утеплителя.

После принятия решения по мероприятиям по утеплению следует повторно рассчитать требуемое сопротивление теплопередаче и сравнить его с требуемым значением сопротивления теплопередаче.

Алгоритм принятия решения об утеплении однослойной стены здания без утеплителя после ремонта трещин и установки пакеров с использованием инъекционного раствора:

1. Определяется требуемое значение сопротивления теплопередаче стены здания.
2. Определяется приведенное сопротивление теплопередаче стены здания с учетом трещин и пакеров, заполненных инъекционным раствором.
3. Если определенное в пункте 2 приведенное сопротивление теплопередаче стены здания меньше требуемого значения сопротивления теплопередаче, определенного в пункте 1, то делается вывод о необходимости проведения мероприятий по устройству слоя утеплителя.

4. После проведения мероприятий по утеплению стены здания необходимо повторно провести сравнение требуемого сопротивления теплопередаче с приведенным.

5. Если приведенное сопротивление теплопередаче стены здания меньше требуемого значения сопротивления теплопередаче, определенного в пункте 1, то делается вывод о необходимости проведения мероприятий по увеличению толщины слоя утеплителя.

6. Пункты 4 и 5 необходимо повторять до тех пор, пока нормы по тепловой защите стены здания не будут выполнены.

Алгоритм принятия решения о дополнительном утеплении многослойной стены здания с утеплителем после ремонта трещин и установки пакеров с использованием инъекционного раствора:

1. Определяется требуемое значение сопротивления теплопередаче стены здания.

2. Определяется приведенное сопротивление теплопередаче стены здания с учетом трещин и пакеров, заполненных инъекционным раствором.

3. Если определенное в пункте 2 приведенное сопротивление теплопередаче стены здания меньше требуемого значения сопротивления теплопередаче, определенного в пункте 1, то делается вывод о необходимости проведения мероприятий по увеличению толщины слоя утеплителя.

4. После проведения мероприятий по увеличению толщины слоя утеплителя необходимо повторно провести сравнение требуемого сопротивления теплопередаче с приведенным.

5. Пункты 3 и 4 необходимо повторять до тех пор, пока нормы по тепловой защите стены здания не будут выполнены.

5.5. Выводы по главе 5

Проведена оценка влияния трещин в стенах на теплозащитную оболочку здания.

Предложена уточненная формула для определения приведенного сопротивления теплопередаче стен зданий с учетом отремонтированных трещин и установленных пакеров.

Представлена принципиальная схема развертки стены здания с нанесенными на неё двумя типами трещин и с двумя разными типами пакеров. Данная схема поясняет работу разработанной формулы для случаев наличия в стене нескольких типов трещин и пакеров. Трещины считаются различными если имеют разную глубину или ширину раскрытия. Пакеры считаются различными, если имеют разный диаметр или глубину установки.

Разработанный подход по учету влияния трещин и пакеров, заполненных инъекционным раствором, на значение приведенного сопротивления теплопередаче проиллюстрирован двумя примерами.

В первом примере рассматривается коттеджный дом в городе Оренбург с однослойной стеной из пенобетонных блоков без утеплителя. Для климатических условий строительства требуемое сопротивление теплопередаче составило $3,12 \text{ (м}^2 \cdot ^\circ\text{С) / Вт}$. После появления в стене трещин и проведения их инъектирования добавились ещё 2 теплотехнические неоднородности: трещины и пакеры, заполненные инъекционным раствором. Снижение приведенного сопротивления теплопередаче с $3,31 \text{ (м}^2 \cdot ^\circ\text{С) / Вт}$ до $2,99 \text{ (м}^2 \cdot ^\circ\text{С) / Вт}$ из-за трещин и пакеров, заполненных инъекционным раствором, составило 9,7 %. Данное значение ниже требуемого сопротивления теплопередаче, что не допускает строительство данной ограждающей конструкции. Сделан вывод, что для строительства данной ограждающей конструкции необходимо предусмотреть мероприятия по утеплению стены здания.

Во втором примере рассматривается здание школы в поселке Ватутинки (Московская область) со стеной из кладки из блоков из пенобетона, утепленной

минеральной ватой. Для климатических условий строительства требуемое сопротивление теплопередаче составило $2,93 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C) / Вт}$. Для данного дома с учетом теплотехнических неоднородностей приведенное сопротивление теплопередаче стены здания составило $3,06 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C) / Вт}$. После появления в стене сквозных трещин при ширине раскрытия 8 мм и проведения их инъектирования с помощью пакеров диаметром 16 мм добавились ещё 2 теплотехнические неоднородности: трещины и пакеры, заполненные инъекционным раствором. Снижение приведенного сопротивления теплопередаче с $3,06 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C) / Вт}$ до $2,83 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C) / Вт}$ из-за трещин и пакеров, заполненных инъекционным раствором, составило 7,5 %. Сделан вывод, что для строительства данной ограждающей конструкции необходимо предусмотреть мероприятия по увеличению толщины слоя утеплителя.

Для рассмотренных примеров построены диаграммы по сравнению требуемого сопротивления теплопередаче с приведенным сопротивлением теплопередаче без трещин и пакеров и с приведенным сопротивлением теплопередаче с учетом трещин и пакеров, заполненных инъекционным раствором. Определены доли общего потока теплоты, через различные фрагменты ограждающих конструкций стен зданий.

Для второго примера представлены: фрагмент плана здания и фрагмент развертки стены здания. Показано определение удельных потерь теплоты для трещин и пакеров с использованием разработанных в диссертации номограмм.

Разработан алгоритм принятия решения о дополнительном утеплении стены здания после ремонта трещин с использованием инъекционного раствора. Отдельно представлены алгоритмы для однослойных ограждающих конструкций без утеплителя и для многослойных ограждающих конструкций с утеплителем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен обзор литературы по экспериментальным и расчетным способам определения температурного поля узлов ограждающих конструкций зданий, на основании которого приняты решения о математическом моделировании температурного поля с помощью дифференциального уравнения теплопроводности и разработки экспериментального устройства по определению удельных потерь теплоты через трещины в стенах зданий.

2. Проведено математическое моделирование температурных полей узлов ограждающих конструкций с трещинами и пакерами, заполненными инъекционным раствором, для стен зданий с основаниями кладки из блоков из пенобетона, кладки из кирпича и железобетона. В результате моделирования получены значения удельных потерь теплоты для трещин и пакеров, заполненных инъекционным раствором.

3. Разработаны номограммы удельных потерь теплоты, которые позволяют определять удельные потери теплоты через трещины и пакеры, заполненные инъекционным раствором. Предложенные номограммы позволяют определить удельные потери теплоты упрощенно без необходимости построения температурного поля.

4. Сконструировано новое экспериментальное устройство по определению удельных потерь теплоты ограждающих конструкций здания, содержащих отремонтированные трещины.

5. Проведены эксперименты на новом устройстве, которые позволили определить удельные потери теплоты через трещины стен зданий, содержащих основания из блоков из пенобетона, кирпича и железобетона. Данные эксперименты подтвердили результаты математического моделирования температурного поля стен зданий с трещинами, заполненными инъекционным раствором.

6. Разработан уточненный инженерный метод расчета приведенного сопротивления теплопередаче стен зданий, учитывающий трещины и пакеры, заполненные инъекционным раствором. Данный метод позволяет обосновывать решения по дополнительному утеплению стен зданий после их ремонта.

Рекомендации по использованию результатов диссертации:

1. Рекомендуется использовать предложенные номограммы для определения удельных потерь теплоты через трещины и пакеры, заполненные инъекционным раствором, в практической инженерной работе для вычисления приведенного сопротивления теплопередаче стен зданий.

2. Рекомендуется использовать разработанный экспериментальный подход по определению удельных потерь теплоты через трещины стен зданий, заполненных инъекционным раствором, в деятельности исследовательских лабораторий для экспериментального определения удельных потерь теплоты различных типов трещин.

3. Рекомендуется принимать решения о дополнительном утеплении стены здания после ремонта трещин с использованием выведенной уточненной формулы по определению приведенного сопротивления теплопередаче стены здания с учетом трещин и пакеров, заполненных инъекционным раствором.

Перспективы дальнейшей разработки темы диссертации:

1. Рассмотрение большего количества отремонтированных повреждений ограждающих конструкций и исследование их влияния на температурное поле зданий.

2. Исследование влияния трещин и пакеров, заполненных инъекционным раствором, на потери теплоты ограждающих конструкций зданий, постоянно контактирующих с грунтовой влагой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аузин, А.А. Информационные возможности георадиолокационного метода при обследовании строительных объектов / А.А. Аузин // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. – 2022. – № 2. – С. 54-62.
2. Афанасьева, В.В. Анализ дефектов несущих конструкций производственного здания / В.В. Афанасьева, С.Д. Николенко, С.А. Сазонова // Моделирование систем и процессов. – 2022. – Т. 15. – № 1. – С. 14-24.
3. Баженов, Д.В. Сравнительный анализ методов восстановления горизонтальной гидроизоляции в каменных конструкциях / Д.В. Баженов, И.С. Полянских // Современное строительство и архитектура. – 2023. – № 1 (32). – С. 19-22.
4. Балицкий, Д.А. Биоминерализующий состав как модифицирующий компонент ремонтных смесей: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 2.1.5 / Балицкий Дмитрий Андреевич. – Белгород, 2024. – 20 с.
5. Бармотин, А.А. Информационное моделирование при выполнении обследования зданий / А.А. Бармотин, Е.А. Дмитренко, А.С. Волков, С.Н. Машталер, А.В. Недорезов, К.А. Казак, Н.А. Севостьянов // Современное промышленное и гражданское строительство. – 2024. – Т. 20. – № 2. – С. 93-109.
6. Басов, С.А. Системы внешнего армирования и инъектирование бетонных конструкций / С.А. Басов // Путь и путевое хозяйство. – 2022. – № 7. – С. 10-12.
7. Белоус, А.Н. Моделирование теплового режима учебного помещения. Проблемы и перспективы / А.Н. Белоус, М.В. Оверченко, Д.В. Выборнов // Строитель Донбасса. – 2022. – № 3 (20). – С. 68-72.
8. Белых, А.Н. Восстановление и повышение характеристик бетона с помощью эпоксидной смолы: метод инъектирования бетона / А.Н. Белых., И.А.

Астахов, Р.А. Ткач // Наука и бизнес: пути развития. – 2021. – № 11 (125). – С. 71-73.

9. Богачев, Б.А. Причины возникновения усталостных трещин в подкрановых балках мостовых кранов тяжелого режима работы / Б.А. Богачев, Н.А. Бузало, В.Е. Лосева, А.А. Филилеев // Строительство и архитектура. – 2023. – Т. 11, № 4. – С. 2.

10. Бузало, Н.А. Анализ характерных повреждений несущих и ограждающих конструкций, выявленных при обследовании школьных зданий в Ростовской области / Н.А. Бузало, М.Ю. Клименко, Р.Р. Пономарев // Строительство и архитектура. – 2021. – Т. 9. – № 2. – С. 1-5.

11. Быков, А.А. Комплексная оценка деформационного процесса в усиленных углепластиком железобетонных балках / А.А. Быков, И.Н. Шардаков, А.П. Шестаков, И.О. Глот // Строительство и реконструкция. – 2023. – № 2 (106). – С. 4-24.

12. Величкин, В.З. Комбинированные технологии усиления простенков и колонн / В.З. Величкин, Ю.И. Тилинин, Д.А. Животов // Вестник гражданских инженеров. – 2019. – № 6(77). – С. 186-192.

13. Веселов, В.В. Инновационные способы усиления стен / В.В. Веселов // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2024. – Т. 21. – № 4. – С. 944-953.

14. Волгин, А.Л. Термографический осмотр наружных стен жилых домов различных технологий строительства / А.Л. Волгин, В.А. Шаманов, А.Д. Адулова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2025. – № 3 (59). – С. 38-49.

15. Вытчиков Ю.С. Влажностный режим строительных ограждающих конструкций сушильного отделения тульского пивзавода / Ю.С. Вытчиков, М.Е. Сапарев, А.А. Чулков, Д.Д. Конякина // Градостроительство и архитектура. – 2024. – Т. 14, № 1(54). – С. 46-54.

16. Вытчиков, Ю.С. Оценка теплозащитных характеристик строительных ограждающих конструкций здания гостиницы мужского монастыря / Ю.С. Вытчиков, И.Г. Беляков, М.Е. Сапарёв // Градостроительство и архитектура. – 2021. – Т. 11. – № 4 (45). – С. 72-80.

17. Галаева, Н.Л. Исследование влияния армирования швов кладки металлической сеткой на теплозащитные свойства ограждающих конструкций / Н.Л. Галаева // Экономика строительства. – 2024. – № 10. – С. 451-455.

18. Галаева, Н.Л. Исследование теплотехнических характеристик ограждающих конструкций в местах узлов опирания многпустотных плит перекрытия на наружные стены / Н.Л. Галаева // Экономика строительства. – 2025. – № 9. – С. 511-513.

19. Гарбуз, А.Ю. Повышение эффективности ремонта бетонных облицовок оросительных каналов композитными материалами: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 06.01.02 / Гарбуз Александр Юрьевич. – Новочеркасск, 2021. – 26 с.

20. Горелов, А.В. Применение буроинъекционных технологий с использованием быстросхватывающихся смесей при ремонте причальных сооружений / А.В. Горелов, А.И. Мошков // Гидротехника. – 2021. – № 4 (65). – С. 88-89.

21. ГОСТ 26254-84. Здания и сооружения. Методы определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций : Государственный стандарт Союза ССР : издание официальное : введен впервые : дата введения 1985-01-01. – Москва : Издательстве стандартов, 1985. – 27 с.

22. ГОСТ Р 59939-2021. Здания и сооружения. Метод определения сопротивления теплопередаче в натурных условиях : Национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : введен впервые : дата введения 2021-12-07. – Москва : Российский институт стандартизации, 2022. – 24 с.

23. Грановский, А.В. Инъекционные составы для повышения прочности и монолитности кирпичной кладки / А.В. Грановский, Ю.С. Кунин, О.Е. Легецкий // Промышленное и гражданское строительство. – 2023. – № 4. – С. 16-20.

24. Грановский, А.В. Оценка прочности кирпичной кладки, усиленной инъекционным составом / А.В. Грановский, Ю.С. Кунин, О.Е. Легецкий // Промышленное и гражданское строительство. – 2023. – № 2. – С. 37-43.
25. Дацюк, Т.А. К вопросу о повышении точности оценки теплозащитных свойств ограждающих конструкций / Т.А. Дацюк, А.Н. Соколов // Инженерный вестник Дона. – 2026. – № 2 (134).
26. Дорошин, И.Н. Исследование рациональных методов усиления кирпичной кладки при проведении работ по реконструкции зданий / И.Н. Дорошин, Н.Р. Котов, М.Р. Макачук // Components of Scientific and Technological Progress. – 2024. – № 5 (95). – С. 31-37.
27. Естафьева, Н.Ю. Наполненная двухкомпонентная полимерная система холодного отверждения для защиты строительных изделий и конструкций от воздействия агрессивных сред: дис. ... канд. техн. наук: 2.1.5 / Естафьева Наталья Юрьевна. – Волгоград, 2024. – 158 с.
28. Жадановский, Б.В. Организационно-технологические решения устранения трещин в железобетонных фундаментных плитах / Б.В. Жадановский, Л.А. Пахомова, М.В. Краюшкин, Е.В. Рачковская // Инженерный вестник Дона. – 2024. – № 2 (110). – С. 301-311.
29. Иванова, Е.А. Исследование пространственного теплопереноса в угловом фрагменте наружного ограждения с коннекторами / Е.А. Иванова, Н.В. Мещеулов // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. – 2021. – Т. 7. – № 4 (28). – С. 46-61.
30. Иванова, Е.А. Повышение тепловой защиты ограждающей конструкции в области наружного угла / Е.А. Иванова, В.В. Пенявский // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2023. – Т. – 25. – № 5. – С. 108-119.

31. Ищук, Е.М. Усиление кирпичной кладки инъекцией метилметакрилата / Е.М. Ищук, М.К. Ищук // Вестник НИЦ Строительство. – 2024. – № 3 (42). – С. 111-123.
32. Ищук, М.К. Исследования прочности и деформаций исторической кладки / М.К. Ищук, Е.М. Ищук // Вестник НИЦ Строительство. – 2025. – № 4 (47). – С. 33-46.
33. Кецко, Е.С. Жизненный цикл здания образовательной организации с проверкой состояния несущих конструкций / Е.С. Кецко, В.И. Римшин, Р.В. Лесовик, Г.А. Смоляго // Вестник евразийской науки. – 2023. – Т. 15. – № 6.
34. Коллеганов, Н.А. Прочность, жесткость и трещиностойкость железобетонных балок с бетоном каркасной структуры в сжатой зоне: дис. ... канд. техн. наук: 2.1.1 / Коллеганов Никита Алексеевич. – Ростов-на-Дону, 2025. – 169 с.
35. Кузнецов, А.В. Узлы сопряжения диска перекрытия с ограждающими стеновыми конструкциями в монолитном домостроении: дис. ... канд. техн. наук: 2.1.1 / Кузнецов Алексей Витальевич. – Санкт-Петербург, 2023. – 206 с.
36. Кульков, С.А. Инъекционные полиуретановые составы для промышленной гидроизоляции: подбор материалов-аналогов в условиях импортозамещения / С.А. Кульков, А.В. Савич // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия: Строительство. Электротехника и химические технологии. – 2023. – № 2 (18). – С. 85-96.
37. Кучеренко, В.А. Определение причин образования трещин в несущих и ограждающих конструкциях бассейна в здании / В.А. Кучеренко, В.Л. Курбатов, В.И. Римшин // Эксперт: теория и практика. – 2022. – № 1 (16). – С. 75-81.
38. Ледина, М.В. Рекомендации по применению специальных бетонов при ремонте сооружений водного транспорта / М.В. Ледина // Гидротехника. – 2022. – № 3 (68). – С. 82-85.
39. Мерщиев, А.А. Моделирование нестационарного теплового режима помещения с деревянными ограждающими конструкциями / А.А. Мерщиев, П.А. Головинский, М.В. Свирин, А.С. Семиненко // Вестник Белгородского

государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2022. – № 8. – С. 35-49.

40. Мерщиев А.А. Распространение теплового потока в толще ограждающей конструкции из массива дерева / А.А. Мерщиев, Р.А. Шепс, М.С. Кононова, С.А. Яременко // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. – 2022. – № 2(21). – С. 57-62.

41. Минасян, А.А. Прочность и деформативность коррозионно-поврежденных железобетонных плит перекрытия с учетом трещинообразования: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / Минасян Арман Арамаисович. – Москва, 2021. – 24 с.

42. Моргунов, К.П. Возникновение и развитие трещины в бетоне устоя нижней головы шлюза № 2 Волго-Балтийского водного пути / К.П. Моргунов // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2022. – Т. 14. – № 6. – С. 849-861.

43. Моргунов, К.П. Разжижение грунтов - причина аварий на гидротехнических сооружениях / К.П. Моргунов, П.А. Гарибин // Гидротехника. – 2022. – № 4(69). – С. 9-18.

44. Мыскин, С.М. Исследование температурных полей неоднородной наружной стены с монолитным железобетонным каркасом / С.М. Мыскин, Т.И. Королева, М.А. Ивачев // Строительство: наука и образование. – 2024. – Т. 14. – № 4. – С. 20-38.

45. Наумов, А.Е. Теоретические основы управления жизненным циклом дефекта наружных ограждающих конструкций высотного объекта капитального строительства / А.Е. Наумов, М.О. Суворова, Г.А. Лесовик, К.С. Поддубровская // Вестник евразийской науки. – 2024. – Т. 16. – № 6.

46. Николенко, С.Д. Моделирование процесса износа кирпичных зданий / С.Д. Николенко, С.А. Сазонова, Н.В. Акамсина // Моделирование систем и процессов. – 2021. – Т. 14. – № 1. – С. 44-50.

47. Николенко, С.Д. Моделирование работы конструкций из дисперсно-армированного бетона при знакопеременной динамической нагрузке большой интенсивности / С.Д. Николенко, С.А. Сазонова, В.Ф. Асминин // Моделирование систем и процессов. – 2021. – Т. 14, № 3. – С. 36-44.

48. Орлович, Р.Б. Причины и механизмы повреждения штукатурного покрытия фасадов исторических каменных зданий / Р.Б. Орлович, А.С. Горшков, Н.Н. Шангина, А.М. Харитонов // Социология города. – 2023. – № 2. – С. 59-77.

49. Патент на изобретение 2758806 Российская Федерация, МПК E04G 23/00. Способ подготовки к оценке технического состояния зданий по внешним признакам / Фомин Н.И., Бернгардт К.В., Орлова Е.А., Идиятшина Э.Н.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина". – № 2020140697; заявл. 10.12.2020; опубл. 02.11.2021; Бюл. № 31. – 5 с.

50. Патент на изобретение 2786782 Российская Федерация, МПК G01N 3/12. Способ испытания образцов фасадных конструкций с приложением равномерно распределенной нагрузки / Павлова М.О., Захаров В.А., Павленко М.Н., Кушнир С.В., Рютин И.А., Стульева И.В.; заявитель и патентообладатель Акционерное общество "Научно-исследовательский центр "Строительство". – № 2022102895 заявл. 07.02.2022; опубл. 26.12.2022; Бюл. №36. – 13 с.

51. Патент на изобретение 2810661 Российская Федерация, МПК C04B 33/04, C09K 17/08, C09K 8/05. Бентонитовый структурообразователь для строительства, затрубного инъецирования и щитовой проходки туннелей / Ветюгов А.В., Беленко Е.В., Проскурин Д.В.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "Бентонит Кургана" – № 2023109287; заявл. 12.04.2023; опубл. 28.12.2023; Бюл. №1. – 8 с.

52. Патент на изобретение 2822837 Российская Федерация, МПК C04B 26/06, E04G 23/02. Метакриловая композиция для ремонта бетона / Шубин Н.Е., Гордеев А.С.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной

ответственностью "Системные продукты для строительства". – № 2023134618; заявл. 22.12.2023; опубл. 15.07.2024; Бюл. №20. – 10 с.

53. Патент на изобретение 2825240 Российская Федерация, МПК E04G 23/02. Конструкция усиления кирпичного простенка / Веселов В.В., Анцифиров А.И.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования "Петербургский государственный университет путей сообщения имени Императора Александра I". – № 2024105714; заявл. 04.03.2024; опубл. 22.08.2024; Бюл. № 24. – 8 с.

54. Патент на изобретение 2840000 Российская Федерация, МПК E02B 1/00, C04B 18/10. Способ восстановления железобетонных и бетонных элементов конструкции гидротехнических сооружений и инъекционная смесь для его осуществления / Харченко А.И., Харченко И.Я., Ерофеев В.Т., Ерофеева И.В., Пискунов А.А., Смирнов В.Ф., Кендюк А.В., Галабурда И.А.; заявитель и патентообладатель Харченко А.И. – № 2024124393; заявл. 21.08.2024; опубл. 15.05.2025; Бюл. №14. – 14 с.

55. Патент на изобретение 2853833 Российская Федерация, МПК E04G 23/02. Способ ремонта и усиления железобетонных изгибаемых строительных конструкций с поперечными трещинами в растянутой зоне / Еремеев П.В., Еремеев Д.В., Еремеев В.П.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Казанский государственный архитектурно-строительный университет". – № 2025104445; заявл. 26.02.2025; опубл. 26.12.2025; Бюл. №36. – 7 с.

56. Патент на полезную модель 230167 Российская Федерация, МПК E21D 11/38, E02D 31/04, B32B 3/12. Гидроизоляционный слой в двухслойной железобетонной ограждающей конструкции / Кобидзе Т.Е., Конюхов Д.С.; заявитель и патентообладатель Кобидзе Т.Е., Конюхов Д.С. – № 2024106984; заявл. 18.03.2024; опубл. 19.11.2024; Бюл. №32. – 11 с.

57. Пафнутьев, И.С. Обследование жилого дома первой массовой серии в городе Макеевка / И.С. Пафнутьев, Н.В. Прядко // Вестник Донбасской

национальной академии строительства и архитектуры. – 2021. – № 4 (150). – С. 91-97.

58. Пахоменко, Е.В. Расчёт удельных потерь теплоты посредством моделирования трёхмерного температурного поля / Е.В. Пахоменко // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. – 2025. – № 10 (286). – С. 72-75.

59. Плотников, А.А. Учет температурных воздействий при проектировании несущих конструкций / А.А. Плотников // Жилищное строительство. – 2021. – № 11. – С. 21-26.

60. Пшеничкина, В.А. Исследование методов усиления конструкций и выявление основных требований / В.А. Пшеничкина, В.А. Кулаев // Экономика строительства. – 2025. – № 1. – С. 516-518.

61. Русанов, А.Е. Исследование влияния дефектов устройства навесных фасадных систем на теплозащитные свойства стеновых ограждающих конструкций / А.Е. Русанов, С.Г. Головнев // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. – 2014. – № 2. – С. 92-95.

62. Русанов А.Е. Исследование влияния дефектов строительных работ на теплозащитные свойства фрагмента ограждающей конструкции с устройством навесной фасадной системы / А.Е. Русанов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2013. – Т. 13. – № 2. – С. 38-42.

63. Русанов А.Е. Исследование влияния дефектов устройства навесных фасадных систем на теплозащитные свойства стеновых ограждающих конструкций / А.Е. Русанов, С.Г. Головнев // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. – 2014. – № 2. – С. 92-95.

64. Русанов, А.Е. Организация строительного контроля по параметрам энергетической эффективности / А.Е. Русанов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2014. – Т. 14. – № 2. – С. 15-17.

65. Саденко, Д.С. Внутренние дефекты в бетонных конструкциях: диагностика и методика устранения / Д.С. Саденко, И.Н. Гарькин // Региональная архитектура и строительство. – 2021. – № 2 (47). – С. 77-81.

66. Сазонов, А.К. Трехмерное моделирование температурных полей в угловых зонах наружных стен / А.К. Сазонов, Г.В. Сухарев, О.Ш. Белявская // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. – 2023. – № 6-2 (67). – С. 34-36.

67. Самарин, О.Д. Сравнение аналитических и численных методов расчета стационарных температурных полей в объектах строительства / О.Д. Самарин, Д.А. Кирушок // Энергосбережение и водоподготовка. – 2024. – № 1 (147). – С. 52-56.

68. Самарин, О.Д. Уточненный расчет скорости промерзания наружных ограждающих конструкций / О.Д. Самарин // Энергосбережение и водоподготовка. – 2023. – № 2 (142). – С. 49-52.

69. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2026613627 Российская Федерация. ГАЭС–Томограмма / Рубин О.Д., Александров А.В., Антонов А.С., Тищенко А.А., Шапошников Е.А.; заявитель и правообладатель Акционерное общество «Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт «Гидропроект» им. С.Я. Жука». – № 2026611970; заявл. 30.01.2026; опубли. 09.02.2026.

70. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2026615492 Российская Федерация. Структура-аналитик: комплексная оценка технического состояния частично разрушенных гражданских жилых зданий / Сабитов Л.С., Киямова Л.И., Ахтямова Л.Ш., Али Л., Гарькин И.Н., Гарькина И.А., Чанчина В.Е.; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Казанский государственный энергетический университет". – № 2026614414; заявл. 20.02.2026; опубли. 26.02.2026.

71. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2025618594 Российская Федерация. Анализ износа строительных конструкций / Синякин Д.С.;

заявитель и правообладатель Синякин Д.С. – № 2025615988; заявл. 22.03.2025; опубл. 04.04.2025.

72. Семикин, П.В. Натурное обследование и теплотехнический расчет термически неоднородных ограждающих конструкций зданий / П.В. Семикин, В.Н. Должиков, Т.П. Бацунова // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2021. – № 5 (749). – С. 97-106.

73. Ситников, А.М. Совершенствование технологии по устройству инъекционной гидроизоляции с применением полимерцементных композиций / А.М. Ситников, Р.С. Бахшалыев, Г.Д. Приписнов, Р.С. Ковалев // Инженерный вестник Дона. – 2024. – № 7 (115). – С. 444-452.

74. Скорикова М.И. Влияние реологических характеристик бетона и воздействие неравномерной нагрузки на напряженного-деформированное состояние защитной оболочки АЭС: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.14.03 / Скорикова Мария Игоревна. – Москва, 2022. – 23 с.

75. Смирнова, Н.В. Технология устройства инъекционной гидроизоляции из минеральных компонентов для эксплуатируемых зданий: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.08 / Смирнова Надежда Витальевна. – Москва, 2021. – 151 с.

76. СНиП 23-02-2003. Тепловая защита зданий : Строительные нормы и правила Российской Федерации : издание официальное : введен впервые : дата введения 2003-10-01. – Москва : Государственный комитет Российской Федерации по строительству и жилищно-коммунальному комплексу (Госстрой России), 2004. – 30 с.

77. Сокова, С.Д. Гидроизоляция фундаментов эксплуатируемых зданий инъекционными смесями с устройством упорной стенки / С.Д. Сокова, Н.В. Смирнова // БСТ: Бюллетень строительной техники. – 2021. – № 3 (1039). – С. 52-53.

78. СП 230.1325800.2015. Конструкции ограждающие зданий. Характеристики теплотехнических неоднородностей : Свод правил : издание официально: введен впервые : дата введения 2015-04-30. – Москва : 2015. – 93 с.

79. СП 23-101-2004. Проектирование тепловой защиты зданий : Свод правил по проектированию и строительству : издание официальное : взамен СП 23-101-2000 : дата введения 2004-06-01. – Москва : 2004. – 145 с.

80. СП 50.13330.2024. Тепловая защита зданий : Свод правил : издание официальное : взамен СП 50.13330.2012 : дата введения 2024-06-16. – Москва : Российский институт стандартизации, 2024. – 74 с.

81. Тихомиров, С.А. Численное и натурное исследование дефектных участков наружных ограждающих конструкций с повышенной воздухопроницаемостью / С.А. Тихомиров, К.С. Тихомиров // Инженерный вестник Дона. – 2023. – № 8 (104). – С. 394-407.

82. Токарева, А.Н. Анализ теплозащитных ограждающих конструкций ремонтного цеха / А.Н. Токарева, В.Н. Литвинов, С.В. Панченко, В.С. Брындин // Энергосбережение и водоподготовка. – 2022. – № 4 (138). – С. 41-46.

83. Туснина, О.А. Оценка тепловой эффективности наружных вертикальных ограждений зданий / О.А. Туснина, В.М. Туснина // Вестник МГСУ. – 2026. – Т. 21. – № 1. – С. 67-83.

84. Чайковская, Л.В. К вопросу формирования энергоэффективной городской среды / Л.В. Чайковская, В.В. Проломова, К.С. Рощупкин // БСТ: Бюллетень строительной техники. – 2026. – № 3(1099). – С. 53-55.

85. Чайковская, Л.В. Результаты обследования технического состояния подпорной стены в г. Курске / Л.В. Чайковская, Д.А. Бредихин, Р.М. Эседуллаев, Г.В. Дедикин, Е. Скуркан // БСТ: Бюллетень строительной техники. – 2024. – № 5 (1077). – С. 17-19.

86. Черныш, А.С. Методика оценки состояния ограждающих конструкций зданий на территории жилой застройки подлежащей реновации / А.С. Черныш, А.И. Поляков // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2023. – № 1. – С. 53-60.

87. Чиркунов, Ю.А. Решение проблемы растрескивания при 3И-печати ограждающих конструкций полистиролбетоном с использованием подмодели

модели динамического деформирования трансверсально-изотропной термоупругой среды / Ю.А. Чиркунов, Е.О. Пикмуллина, В.В. Молодин, А.А. Лapidус, Д.В. Топчий // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2022. – № 4 (760). – С. 99-108.

88. Чубатов, И.В. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния основания гидротехнических сооружений при компенсационном нагнетании: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.07 / Чубатов Иван Валерьевич. – Москва, 2022. – 151 с.

89. Шашкин, А.Г. Инженерная реставрация Санкт-Петербургской консерватории / А.Г. Шашкин, А.Е. Запорожцев, В.А. Шашкин, В.В. Черенов, Л.А. Глыбин, С.А. Волобой, Р.Р. Хисамов // Жилищное строительство. – 2026. – № 1-2. – С. 69-80.

90. Шевченко, М.А. Ремонт и усиление каменных кладок (восстановление сплошности) в условиях отрицательных температур / М.А. Шевченко, С.Л. Решетников, А.А. Костенко // Строительство и архитектура. – 2024. – Т. 12. – № 3 (44). – С. 1.

91. Шеина, С.Г. Материалы и технологии для восстановления объектов башенного типа / С.Г. Шеина, Д.К.С. Батаев, М.М. Малороев, П.Д. Батаева // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2022. – Т. 49. – № 3. – С. 146-151.

92. Шипелев, И.Л. Методы реставрации кладки с применением технологии вклеивания спиральных анкеров при проведении работ на объектах культурного наследия / И.Л. Шипелев, Л.В. Марыгина // Инновации и инвестиции. – 2024. – № 6. – С. 550-553.

93. Шмелев, А.Г. Влияние трещин в наружных стенах здания на их теплозащитные характеристики / А.Г. Шмелев, Н.А. Драпалюк, Г.Д. Шмелев // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. – 2023. – № 1 (24). – С. 18-25.

94. Шмелев, Г.Д. Анализ нормативно-технической документации по комплексному обследованию жилых зданий перед разработкой проекта капитального ремонта / Г.Д. Шмелев, А.Н. Ишков, Д.А. Драпалюк // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. – 2023. – № 4 (27). – С. 9-18.
95. Щипачева, Е.В. Научные основы методики оценки степени износа здания с позиции снижения теплозащитных свойств его ограждающих конструкций / Е.В. Щипачева, С.С. Шаумаров // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2021. – № 4. – С. 54-63.
96. Ярцев, В.П. Анализ распределения температур по толщине ограждающих конструкций с утеплением из пенополистирола и минераловаты / В.П. Ярцев, А.В. Полякова // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2021. – № 5 (268). – С. 57-61.
97. Ярцев, В.П. Сравнение теплотехнических характеристик пенополистирола и минеральной ваты в условиях атмосферных воздействий / В.П. Ярцев, А.А. Крюкова // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2021. – Т. 27. – № 3. – С. 468-475.
98. Adnan, Y. Field measurements of adaptive thermal comfort in naturally ventilated homes of Malaysia's hot-humid climate / Y. Adnan, N. Jaffar, H. Razali, L.K. Wooi, C.H. Lim // Buildings. – 2026. – Vol. 16. – Iss. 7. – № 1419.
99. Baltazar, L.G. Performance of silica fume-based geopolymer grouts for heritage masonry consolidation / L.G. Baltazar // Crystals. – 2022. – Vol. 12. – Iss. 2. – № 288.
100. Cattaneo, S. Tensile capacity of adhesive anchors in damaged masonry / S. Cattaneo, N. Vafa // Applied Sciences. – 2021. – Vol. 11. – Iss. 21. – № 10135.
101. Chen, Z. Mechanism of the EICP centrifugal cementation method for short-term brick crack rehabilitation / Z. Chen, X. Xu, J. Wei, X. Guo, X. Ke // Buildings. – 2026. – Vol. 16. – Iss. 6. – № 1251.
102. Chuang, P.M. A Study on cement-based crack injection materials using reactive ultra-fine fly ash, portland cement (Type I), and sulfoaluminate cement / P.M.

Chuang, W.C. Yeih, R. Huang, T.A. Chen, J.J. Chang // *Buildings*. – 2025. – Vol. 15. – Iss. 7. – № 1193.

103. Damińska-Suchocka, M. Application of TLS technology for documentation of brickwork heritage buildings and structures / M. Damińska-Suchocka, J. Katzer, C. Suchocki // *Coatings*. – 2022. – Vol. 12. – Iss. 12. – № 1963.

104. Dong, X. Concrete surface crack detection algorithm based on improved YOLOv8 / X. Dong, Y. Liu, J. Dai // *Sensors*. – 2024. – Vol. 24. – Iss. 16. – № 5252.

105. Fan, C. Feedback effects of air-conditioning anthropogenic heat on cooling energy consumption in residential buildings: a cfd–energyplus co-simulation study / C. Fan, J. Chen, P. Yu // *Buildings*. – 2026. – Vol. 16. – Iss. 8. – № 1610.

106. Hrčka, R. The measurement of hemp concrete thermal and moisture properties for an effective building construction proposal in region of Slovakia (central Europe) / R. Hrčka, P. Štompf, S. Jochim, M.E. Mikuš, M. Iskra // *Materials*. – 2025. – Vol. 18. – Iss. 7. – № 1651.

107. Iavorschi, E. An experimental and numerical investigation of a passive façade and proposals for improving its energy performance / E. Iavorschi, L.D. Milici, P. Atănăsoae, C. Ungureanu // *Energies*. – 2025. – Vol. 18. – Iss. 2. – № 359.

108. Jezierski, W. Optimization of thermal insulation parameters for vertical perimeters in buildings with single-layer walls / W. Jezierski, P. Szczepaniak, C. Leszczyński // *Buildings*. – 2025. – Vol. 15. – Iss. 3. – № 405.

109. Kim, T.K. Comparative analysis of domestic and international test guidelines for various concrete repair materials / T.K. Kim, J.S. Park // *Materials*. – 2022. – Vol. 15. – Iss. 9. – № 3267.

110. Kim, T.K. Experimental evaluation of the durability of concrete repair materials / T.K. Kim, J.S. Park // *Applied Sciences*. – 2021. – Vol. 11. – Iss. 5. – № 2303.

111. Kim, T.K. Performance evaluation of concrete structures using crack repair methods / T.K. Kim, J.S. Park // *Sustainability*. – 2021. – Vol. 13. – Iss. 6. – № 3217.

112. Koo, B.K. Deep learning-supported panoramic infrared framework for quantitative diagnosis of building envelope thermal anomalies / B.K. Koo, H.S. Jin, J.-W. Jeong // *Buildings*. – 2025. – Vol. 15. – Iss. 24. – № 4423.

113. Li, G. Experimental study on the crack concrete repaired via enzyme-induced calcium carbonate precipitation (EICP) / G. Li, D. Yan, J. Liu, P. Yang, J. Zhang // *Materials*. – 2024. – Vol. 17. – Iss. 13. – № 3205.

114. Lim, T. Analysis of the thermal and cooling energy performance of the perimeter zones in an office building / T. Lim, W.-S. Yim, D.D. Kim // *Buildings*. – 2022. – Vol. 12. – Iss. 2. – № 141.

115. Ma X. Spatial performance optimization of high-altitude residential buildings based on the thermal buffer effect: a case study of new-type vernacular housing in Lhasa / X. Ma, Z. Mao, H. Xuan // *Buildings*. – 2025. – Vol. 15. – Iss. 23. – № 4337.

116. Ma, X. Study on seismic behavior of earthquake-damaged joints retrofitted with CFRP in hybrid reinforced concrete–steel frames / X. Ma, T. Guo, Y. Xing, R. Qin, H. Long, C. Bao, F. Cao, R. Hong // *Materials*. – 2025. – Vol. 18. – Iss. 21. – № 4857.

117. Mc. Alorum, J. ConcrEITS: An electrical impedance interrogator for concrete damage detection using self-sensing repairs / J. Mc. Alorum, M. Perry, A.C. Ward, C. Vlachakis // *Sensors*. – 2021. – Vol. 21. – Iss. 21. – № 7081.

118. Muhy Al. Din, S.S. Quantifying the relationship between mean radiant temperature and indoor air temperature across building orientations in hot and dry steppe climates / S.S. Muhy Al. Din, N. Hafizi, H. Altan // *Atmosphere*. – 2025. – Vol. 16. – Iss. 10. – № 1132.

119. Oladiran, O.J. Comparative assessment of the properties of normal concrete and epoxy-repaired concrete / O.J. Oladiran, O.A. Oguntona // *Materials Proceedings*. – 2025. – Vol. 27. – Iss. 1. – № 1.

120. Qin, L. Energy consumption analysis and energy-saving renovation research on the building envelope structure of existing thermal power plants in China's hot summer and cold winter regions / L. Qin, J. Qi, Y. Qi, W. Shi // *Buildings*. – 2026. – Vol. 16. – Iss. 1. – № 169.

121. Rusanov A.E. Heat loss from defects of hinged facade systems of buildings / A.E. Rusanov, A.Kh. Baiburin, D.A. Baiburin, V. Bianco // Magazine of Civil Engineering. – 2020. – № 3 (95). – P. 57-65.
122. Sassine E. Experimental determination of thermal properties of brick wall for existing with of France / E. Sassine, Z. Younsi, Y. Cherif, A. Chauchois, E. Antczak // Journal of Building Engineering. – 2017. – Vol. 14. – P. 15-23.
123. Starczyk-Kołbyk, A. Eco-Friendly rapid-setting concrete incorporating waste-derived additives for post-disaster reconstruction / A. Starczyk-Kołbyk, W. Łasica, E. Kardaszuk, M. Gregorczyk // Materials. – 2026. – Vol. 19. – Iss. 6. – № 1218.
124. Su, B. Thermal performance of school buildings: impacts beyond thermal comfort / B. Su, R. Jadresin Milic, P. Mc. Pherson, L. Wu // International Journal of Environmental Research and Public Health. – 2022. – Vol. 19. – Iss. 10. – № 5811.
125. Sun, N. Mechanical properties and constitutive model of rapid-curing epoxy resin concrete under different temperature conditions / N. Sun, C. Shen, J. Shen, Y. Wang // Materials. – 2026. – Vol. 19. – Iss. 5. – № 996.
126. Sun, Y. Spatiotemporal analysis of temperature distribution in semi-underground potato storage facilities in cold and arid regions of China / Y. Sun, Tana, Q. Zhen, C. Yan, Chasuna, K. Liu // Sustainability. – 2026. – Vol. 18. – Iss. 6. – № 2927.
127. Takva, Ç. Thermal analysis of the building envelope with infrared thermography and simulation in educational buildings in the cold climate region / Ç. Takva, F.G. Takva, F.Z. Çakıcı // Buildings. – 2025. – Vol. 15. – Iss. 11. – № 1759.
128. Tselios, I. Anchors to solid clay brick masonry in tension: behavior under monotonic and repeated loading for constant embedment depth / I. Tselios, E. Vintzileou, D. Karagiannaki, K. Christidis, V. Palieraki, G. Welz // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13. – Iss. 23. – № 12917.
129. Wang, X. Numerical analysis of slurry–crack coupling in grouting repair process of multiple cracks in concrete material / X. Wang, W. Li, M. Shen, H. Wang // Materials. – 2025. – Vol. 18. – Iss. 11. – № 2472.

130. Wang, Y. Experimental study on repairing corroded cracks by electrophoretic deposition / Y. Wang, C. Wang, S. Zhou // *Applied Sciences*. – 2022. – Vol. 12. – Iss. 13. – № 6394.
131. Wu, J. Surface defect detection of nanjing city wall based on uav oblique photogrammetry and TLS / J. Wu, Y. Shi, H. Wang, Y. Wen, Y. Du // *Remote Sensing*. – 2023. – Vol. 15. – Iss. 8. – № 2089.
132. Xie, L. The Impact of traditional raw earth dwellings' envelope retrofitting on energy saving: a case study from zhushan village, in west of Hunan, China / L. Xie, Z. Li, J. Li, G. Yang, J. Jiang, Z. Liu, S. Tong // *Atmosphere*. – 2022. – Vol. 13. – Iss. 10. – № 1537.
133. Xue, X. Study of the convective heat transfer coefficient of different building envelope exterior surfaces / X. Xue, S. Han, D. Guo, Z. Zhao, B. Zhou, F. Li // *Buildings*. – 2022. – Vol. 12. – Iss. 6. – № 860.
134. Yang, C. Exploring comfort and efficiency: comparing vernacular and modern dwellings in rural Handan, northern China / C. Yang, A. Misni // *Sustainability*. – 2026. – Vol. 18. – Iss. 3. – № 1575.
135. Zhang, X. Experimental study and practical application of existing crack repair in concrete dam tunnels using MICP and EICP / X. Zhang, Y. Zhang, H. Luo, B. Peng, Y. Zhang, J. Yao, M.J. Jedrzejko // *Buildings*. – 2025. – Vol. 15. – Iss. 18. – № 3275.
136. Zhangabay N. Assessment and numerical modeling of the thermophysical efficiency of newly developed adaptive building envelopes under variable climatic impacts / N. Zhangabay, A. Oner, U. Ibraimova, M.N.M. Ibrahim, T. Tursunkululy, A. Utelbayeva // *Buildings*. – 2026. – Vol. 16. – Iss. 2. – № 366.

Приложение А
(Справочное)

Справки о внедрении результатов диссертационной работы



**ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
«СТРОЙМАТ и К»**

Основано в 1992 году

РФ, 119526, г. Москва, просп. Вернадского, д.101, корп.1, эт/пом/ком 1/1/54, т (495) 430-76-97, E-mail: klib@list.ru
ОГРН 1027739418024, ИНН 7728046701, КПП 772901001

Аттестат аккредитации испытательной лаборатории №RU.АСК.ИЛ.816 от 25.08.2020 г.

Справка о внедрении

**результатов исследований, полученных в диссертационной работе Добшица
Виктора Львовича «Методика расчета теплопередачи через ограждающие
конструкции зданий при наличии трещин», представленной на соискание
ученой степени кандидата технических наук**

Результаты научных исследований Добшица Виктора Львовича внедрены в деятельность исследовательской лаборатории ООО «Строймат и К».

С применением разработки Добшица В.Л., в лаборатории была построена экспериментальная камера для определения удельных потерь теплоты через испытуемый образец стены здания с трещиной, заполненной инъекционным раствором.

Настоящая экспериментальная камера применяется для определения приведенного сопротивления теплопередаче стен зданий при наличии трещин.

Генеральный директор
ООО «Строймат и К»



Клибанов А.Л.
01.06.2026

**ООО «ЦЕНТР СОДЕЙСТВИЯ СТРОИТЕЛЬСТВУ»**

140000, Московская область, городской округ Люберцы, город Люберцы,
ул. Смирновская, д. 21, корп. 2, подвал, пом. I, комн. 18
ИНН 5027303227, КПП 502701001, Тел.: +7(985) 991-14-35, tsssooo@yandex.ru

Справка о внедрении

результатов исследований, полученных в диссертационной работе Добшица Виктора Львовича «Методика расчета теплопередачи через ограждающие конструкции зданий при наличии трещин», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук

Результаты научных исследований Добшица Виктора Львовича внедрены в проектирование и строительство реконструируемого здания по адресу: г. Подольск, улица Комсомольская, 1 здание лесопилорамы, литера 765 (в осях 8-10/A-B).

При обследовании данного здания были выявлены трещины, которые устранялись инъектированием с установкой пакеров.

Проведено внедрение разработанного Добшицем В.Л. подхода по определению приведенного сопротивления теплопередаче стены здания с применением номограмм для определения удельных потерь теплоты через трещины стен зданий и номограмм удельных потерь теплоты через пакеры.

Учет трещин, заполненных инъекционным раствором, и пакеров как дополнительных теплотехнических неоднородностей в стене здания на стадии расчета изменили первоначальное проектное решение, т.к. позволили уточнить значение приведенного сопротивления теплопередаче стены здания. В результате внедрения научного подхода Добшица В.Л. было принято решение об увеличении толщины слоя утеплителя в стене здания для удовлетворения требования СП 50.13330.2024 «Тепловая защита зданий» к нормируемому значению приведенного сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции.

Генеральный директор
ООО «ЦЕНТР СОДЕЙСТВИЯ
СТРОИТЕЛЬСТВУ»
03.06.2026



Шишкина Е.А.

Приложение Б
(Справочное)

Титульные листы патентов на изобретения и свидетельств о
государственной регистрации программ для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ
НА ИЗОБРЕТЕНИЕ
№ 2866502

Способ для определения удельных потерь теплоты через трещину стены здания, заполненную инъекционным раствором

Патентообладатель: *Зубарев Кирилл Павлович (RU)*

Авторы: *Зубарев Кирилл Павлович (RU), Добшиц Виктор Львович (RU), Казунин Вячеслав Владимирович (RU), Заварзин Никита Юрьевич (RU)*

Заявка № 2026103918
Приоритет изобретения 12 февраля 2026 г.
Дата государственной регистрации в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 20 июля 2026 г.
Срок действия исключительного права на изобретение истекает 12 февраля 2046 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности



Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023682072

Программа по оценке влияния дефектов оболочки здания на поток теплоты через конструкцию здания

Правообладатель: *Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы» (РУДН) (RU)*

Авторы: *Зубарев Кирилл Павлович (RU), Добниц Виктор Львович (RU)*



Заявка № 2023680918

Дата поступления 12 октября 2023 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 20 октября 2023 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

документ подписан электронной подписью
Сертификат 429b5a0fe3855164b4196f83b73b4aa7
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 18.06.2023 по 02.08.2024

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2025616756

**Программа для определения теплотехнических
характеристик здания при его обследовании**

Правообладатель: *Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Российский университет дружбы народов имени
Патриса Лумумбы» (RU)*

Авторы: *Зубарев Кирилл Павлович (RU), Добиниц Виктор
Львович (RU)*

Заявка № 2025614290

Дата поступления 04 марта 2025 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 19 марта 2025 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 30001642740603060000026
Подпись: Зубов Юрий Сергеевич
Действителен с 10.03.2024 по 03.10.2025

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2026683997

**Программа для расчета приведенного сопротивления
теплопередаче стен зданий с трещинами и пакерами,
заполненными инъекционным раствором**

Правообладатель: *Зубарев Кирилл Павлович (RU)*Авторы: *Зубарев Кирилл Павлович (RU), Добшиц Виктор
Львович (RU)*

Заявка № 2026683205

Дата поступления 27 июля 2026 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 06 августа 2026 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2026684453

**Программа для оценки удельных геометрических
показателей трещин и пакеров в стенах здания**

Правообладатель: *Зубарев Кирилл Павлович (RU)*Авторы: *Зубарев Кирилл Павлович (RU), Добшиц Виктор
Львович (RU)*

Заявка № 2026683204

Дата поступления 27 июля 2026 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 12 августа 2026 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

Приложение В
(Справочное)

Список опубликованных научных работ

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Публикации в изданиях, включенных в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук»

1. Зубарев, К.П. Сопротивление теплопередаче различных ограждающих конструкций зданий при стационарном и нестационарном влажностном состоянии / К.П. Зубарев, **В.Л. Добшиц**, В.В. Казузин, Ю.С. Зобнина // Components of scientific and technological progress. – 2024. – Том 98. – № 8. – С. 6-10. (ВАК К3)
2. Зубарев, К.П. Тепло-влажноперенос в различных задачах строительства / К.П. Зубарев, А.Ю. Лоптев, **В.Л. Добшиц**, Ю.С. Зобнина // Перспективы науки. – 2024. – Том. 179. – № 8. – С. 67-70. (ВАК К3)
3. Зубарев, К.П. Влияние применения технологии «зеленой» кровли на энергосбережение здания. Обзор литературы / К.П. Зубарев, В.К. Ахметов, З.Р. Алиханова, **В.Л. Добшиц**, Н.Ю. Заварзин // Приволжский научный журнал. – 2025. – Том 74. – № 2. – С. 139-149. (ВАК К2)
4. Зубарев, К.П. Влияние климатических факторов на температурно-влажностный режим фасада здания / К.П. Зубарев, **В.Л. Добшиц**, А.А. Бакирова, В.Д. Федосеев // Перспективы науки. – 2025. – Том 185. – № 2. – С. 57-60. (ВАК К3)
5. Зубарев, К.П. Повышение температурно-влажностных характеристик модульных фасадов зданий / К.П. Зубарев, А.А. Бакирова, В.В. Казунин, **В.Л. Добшиц** // Перспективы науки. – 2025. – Том 185. – № 2. – С. 61-66. (ВАК К3)
6. Зубарев, К.П. Обзор методов математического моделирования температурно-влажностных характеристик различных фасадов зданий / К.П.

Зубарев, **В.Л. Добшиц**, А.А. Бакирова, Ю.А. Сапронова // Components of scientific and technological progress. – 2025. – Том. 105. – № 3. – С. 23-29. (ВАК К3)

7. Зубарев, К.П. Математическое моделирование температурного поля ограждающих конструкций зданий / К.П. Зубарев, М.В. Емельянов, Ю.А. Сапронова, **В.Л. Добшиц**, Н.Ю. Заварзин, В.В. Казунин // Строительство: наука и образование. – 2026. – Том 16. – № 1. – С. 109-125. (ВАК К2)

8. Зубарев, К.П. Исследование теплового режима в ограждающих конструкциях зданий / К.П. Зубарев, Н.Ю. Заварзин, В.В. Казунин, **В.Л. Добшиц** // Components of scientific and technological progress. – 2026. – Том 118. – № 4. – С. 8-12. (ВАК К3)

9. Зубарев, К.П. Исследования теплофизических параметров модульных фасадов / К.П. Зубарев, В.В. Казунин, **В.Л. Добшиц**, Л.Г. Гаранян, М.В. Емельянов, М.А. Слизова // Строительство: наука и образование. – 2026. – Том 16. – № 2. – С. 82-102. // (ВАК К2)

10. Зубарев, К.П. Расчетные исследования температурных полей ограждающих конструкций зданий / К.П. Зубарев, **В.Л. Добшиц**, В.В. Казунин, Л.Г. Гаранян, Д.С. Синельникова // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2026. – Том 28. – № 3. – С. 191-202. (ВАК К2)

11. Зубарев, К.П. Особенности нормирования и измерения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций зданий / К.П. Зубарев, **В.Л. Добшиц**, В.В. Казунин, Л.Г. Гаранян, Д.С. Синельникова // БСТ: Бюллетень строительной техники. – 2026. – Том 1103. – № 7. – С. 39-41. (ВАК К2)

12. Зубарев, К.П. Современные исследования в области устранения трещин с применением технологии инъектирования / К.П. Зубарев, **В.Л. Добшиц**, В.В. Казунин, Л.Г. Гаранян, М.А. Слизова // БСТ: Бюллетень строительной техники. – 2026. – Том 1104. – № 8. – С. 36-38. (ВАК К2)

13. Zubarev, K.P. Mathematical modeling of heat transfer through building envelopes with cracks / K.P. Zubarev, **V.L. Dobshits**, V.V. Kazunin, Y.A. Saproнова,

V.D. Fedoseev, O.V. Kalinina // Construction Materials and Products. – 2026. – Vol. 9. – No. 4. – Art. No. 4. (BAK K2)

14. Zubarev, K.P. Experimental determination of heat losses through cracks in building walls / K.P. Zubarev, **V.L. Dobshits**, V.V. Kazunin, Y.A. Sapronova, V.D. Fedoseev, O.V. Kalinina // Construction Materials and Products. – 2026. – Vol. 9. – No. 5. – Art. No. 5. (BAK K2)

Результаты интеллектуальной деятельности (патенты на изобретения, свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ)

15. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2023682072 Российская Федерация. Программа по оценке влияния дефектов оболочки здания на поток теплоты через конструкцию здания / Зубарев К.П., **Добшиц В.Л.**; заявитель и правообладатель Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы – № 2023680918; заявл. 12.10.2023; опубл. 20.10.2023; Бюл. № 10. – 1 с.

16. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2025616756 Российская Федерация. Программа для определения теплотехнических характеристик здания при его обследовании / Зубарев К.П., **Добшиц В.Л.**; заявитель и правообладатель Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы – № 2025614290; заявл. 04.03.2025; опубл. 19.03.2025; Бюл. № 3. – 1 с.

17. Патент на изобретение 2866502 Российская Федерация, СПК G01N 25/18, G01N 52/72. Способ для определения удельных потерь теплоты через трещину стены здания, заполненную инъекционным раствором / Зубарев К.П., **Добшиц В.Л.**, Казунин В.В. Заварзин Н.Ю.; заявитель и патентообладатель Зубарев К.П. – № 2026103918; заявл. 12.02.2026; опубл. 20.07.2026; Бюл. № 20. – 14 с.

18. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2026683997 Российская Федерация. Программа для расчета приведенного сопротивления теплопередаче стен зданий с трещинами и пакерами, заполненными

инъекционным раствором / Зубарев К.П., **Добшиц В.Л.**; заявитель и правообладатель Зубарев К.П. – № 2026683205; заявл. 27.07.2026; опубл. 06.08.2026; Бюл. № 8. – 1 с.

19. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2026684453 Российская Федерация. Программа для оценки удельных геометрических показателей трещин и пакеров в стенах здания / Зубарев К.П., **Добшиц В.Л.**; заявитель и правообладатель Зубарев К.П. – № 2026683204; заявл. 27.07.2026; опубл. 12.08.2026; Бюл. № 8. – 1 с.