

В
140230700
140230700

Министерство образования и науки
Донецкой Народной Республики
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Донецкий национальный технический университет»

На правах рукописи

УДК 699.86



Копейка Денис Вадимович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ УТЕПЛЕНИИ
ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ**

05.23.03 - теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха,
газоснабжение и освещение

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Донецк – 2020

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк

Научный
руководитель:

кандидат технических наук, доцент
Гридин Сергей Васильевич

Официальные
оппоненты:

доктор технических наук, доцент
Трубаев Павел Алексеевич,
ФГБОУ ВО «Белгородский
государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова», профессор
кафедры энергетики теплотехнологии,
г. Белгород, РФ

кандидат технических наук, доцент
Выборнов Дмитрий Владимирович,
ГОУ ВПО «Донбасская национальная
академия строительства и архитектуры»,
доцент кафедры теплотехники,
теплогазоснабжения и вентиляции,
г. Макеевка, ДНР

Ведущая
организация:

Государственное образовательное
учреждение высшего образования
«Луганский государственный университет
им. В. Даля» ИСА и ЖКХ, г. Луганск, ЛНР

Защита состоится « _ » _____ 2021 г. в ____ часов на заседании диссертационного совета Д 01.005.01 при ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» по адресу: 286123, г. Макеевка, ул. Державина, 2, ауд. учебный корпус № 1, зал заседаний ученого совета. Тел. факс. +38 (0623) 43-70-33. E-mail: d01.005.01@donnasa.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» по адресу 286123, г. Макеевка, ул. Державина, 2, <http://donnasa.ru>.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 01.005.01

Удовиченко З.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Тенденция к повышению стоимости энергетических ресурсов привела к тому, что интерес к энергосберегающим технологиям возрос как на законодательном уровне, так и в процессе проектирования. Одним из наиболее перспективных направлений энергосбережения является модернизация тепловой защиты ограждающих конструкций зданий.

В нашем регионе большинство жилых и общественных зданий не соответствует современным стандартам энергоэффективности. Значительную часть жилого фонда занимают здания типовых серий, возводившиеся с 1959 г. по 1985 г., которые не соответствуют современным нормам по теплофизическим характеристикам. В связи с этим возникает необходимость в модернизации тепловой защиты существующих зданий и проектировании новых зданий с учетом современных стандартов энергосбережения. Ввиду высоких цен на теплоизоляционные материалы и технологии, существует необходимость в детальном анализе различных технологий модернизации ограждающих конструкций на предмет их эффективности.

Приведенные соображения свидетельствуют об актуальности и своевременности тематики диссертационного исследования.

Степень разработанности темы. Возможность и способы повышения энергоэффективности являются частью Национальных стратегий энергосбережения большинства зарубежных стран. В городе Донецк существует своя Программа по реализации энергосберегающих мероприятий на объектах различного назначения, в которой первоочередная роль отводится их модернизации за счет внедрения эффективных энергосберегающих технологий.

Анализу свойств теплоизоляционных материалов посвящены работы Ю.Л. Боброва, Б.М. Шойхет, Е.Ю. Петухова. В работе Овчаренко Е.Г. «Теплоизоляционные материалы и конструкции» собраны и проанализированы многочисленные виды теплоизоляционных материалов и технологий. Также различные виды теплоизоляционных материалов исследованы в работе Ю.П. Горлова «Технологии теплоизоляционных и акустических материалов и изделий». В работе В.А. Воробьева и Р.А. Адрианова «Полимерные теплоизоляционные материалы» детально отображено производство, теплотехнические и физические свойства полимерных теплоизоляционных материалов. Тепловой изоляции ограждающих конструкций посвящены многочисленные работы В.П. Хоменко, Г.Г. Фаренюк. Большой вклад в исследование теплотехнических процессов в зданиях и сооружениях внес В.Н. Богословский в своих работах «Строительная теплофизика» и «Тепловой режим здания».

Анализу энергоэффективности и энергопотребления жилых и общественных зданий, автоматизации систем мониторинга энергопотребления посвящены работы Харитонов А.Ю.

Исследованию современных способов энергосбережения в зданиях и сооружениях посвящены работы Alvaro de Gracia, Luisa F. Cabeza, Lai, С.-М., Wang, Y.-Н., Shameri, M.A., Alghoul, M.A., Sopian, K.

Исследованию эффективности и проблематики систем навесных фасадов с вентилируемой воздушной прослойкой посвятили работы В.Г. Гагарин, В.В. Козлов, Е. Ю. Цыкановский, В.А. Езерский, П.В. Монастырев, А.М. Протасевич. В работах вышеперечисленных ученых проанализированы процессы теплопередачи и воздухообмена в ограждающих конструкциях с навесным вентилируемым фасадом, а также проблемы однородности конструкций вентилируемых фасадов.

Цель работы. Повышение эффективности различных методов термомодернизации ограждающих конструкций зданий путем усовершенствования методов оценки энергоэффективности используемых теплоизоляционных материалов.

Задачи исследования.

- разработать и обосновать критерии эффективности для различных способов термомодернизации ограждающих конструкций;
- разработать методы определения эффективности «точечного утепления» и определить его эффективность на примере жилых зданий типовых серий;
- определение сопротивления теплопередаче конструкций с навесным вентилируемым фасадом с учетом наличия воздушной прослойки;
- определить влияние крепежных элементов навесных вентилируемых фасадов на энергетическую эффективность данного способа термомодернизации;
- проанализировать влияние процессов переноса влаги и конденсации в конструкциях с навесным вентилируемым фасадом на энергетическую эффективность;
- провести анализ экономической эффективности рассматриваемых способов термомодернизации, используя разработанные методы для жилых зданий типовых серий 1-447 и 1-464.

Объект исследования - энергетическая эффективность различных способов термомодернизации ограждающих конструкций.

Предмет исследования – тепломассобменные процессы в ограждающих конструкциях при термомодернизации.

Научная новизна:

- впервые проведена оценка эффективности утепления ограждающих конструкций по технологии «точечное утепление» для жилых зданий типовых серий 1-464 и 1-447;
- разработана модель участка ограждающей конструкции с навесным вентилируемым фасадом с теплопроводным включением в виде кронштейна с анкерным болтом, получены значения коэффициента теплотехнической однородности для различных крепежных элементов;
- впервые определена степень влияния теплопроводных включений навесных вентилируемых фасадов на экономическую эффективность их использования;
- впервые получено выражение для определения среднего значения парциального давления воздуха в воздушной прослойке навесного вентилируемого фасада, с помощью которого возможно адаптировать методику Фокина-Власова для конструкций с воздушными прослойками.

Теоретическая и практическая значимость результатов исследования:

- предложенные в работе критерии оценки эффективности теплоизоляционных материалов позволяют наиболее достоверно определить экономическую и теплотехническую эффективность мероприятий по усовершенствованию тепловой защиты зданий;
- путем определения эффективности навесных вентилируемых фасадов и оценки влияния крепежных элементов на теплотехническую однородность таких систем становится возможным наиболее достоверно оценить экономическую эффективность этого метода утепления ограждающих конструкций;
- метод определения эффективности «точечного» утепления позволяет получить значение температуры в помещении после нанесения дополнительного слоя изоляции;
- разработанный метод определения параметров влагопередачи для навесных вентилируемых фасадов позволяет оценить реальную конденсацию влаги в конструкции;
- материалы диссертационной работы внедрены в учебный процесс подготовки бакалавров по направлению 22.03.03 «Металлургия», профиль Промышленная теплоэнергетика в качестве учебного материала в курсе дисциплины «Источники теплоснабжения и тепловые сети»;
- методики определения теплотехнической и экономической эффективности модернизации ограждающих конструкций зданий, методика оценки параметров теплового комфорта в помещении после утепления наружных стен, методика определения параметров влагопередачи в конструкциях с воздушными прослойками были использованы при выполнении ряда проектов ДПИ НИИ «Теплоэлектропроект».

Методология и методы исследования. При выполнении работы был использован системный подход к исследованию эффективности применения теплоизоляционных материалов и технологий при утеплении ограждающих конструкций зданий. В работе применялись численные и экспериментальные методы исследования. При проведении исследований было использовано математическое моделирование, моделирование процессов теплопередачи в программном комплексе Ansys, планирование полного трехфакторного эксперимента.

Личный вклад соискателя включает постановку цели и задач исследования; формирование критериев эффективности теплоизоляционных материалов и технологий; проведение теоретических и экспериментальных исследований; создание модели конструкции навесного вентилируемого фасада для исследования влияния крепежных элементов на его эффективность; разработку методики для определения параметров накопления влаги в воздушной прослойке; расчеты экономической эффективности.

Положения, выносимые на защиту:

- разработанные теплотехнические и экономические критерии эффективности теплоизоляционных материалов и технологий;

- метод оценки эффективности «точечного» утепления, основывающийся на изменении значения внутренней температуры воздуха;
- модель участка конструкции навесного вентилируемого фасада с теплопроводным включением в виде кронштейна с анкерным болтом, а также метод расчета параметров теплотехнической и экономической эффективности с учетом изменения теплотехнической однородности;
- разработанный метод определения параметров паропроницания и расположения плоскости возможной конденсации в конструкциях с вентилируемой прослойкой.

Степень достоверности. Достоверность результатов диссертационной работы и выводов обоснованы применением законов теплопередачи, корректностью математической постановки задачи, использованием современных программных комплексов и методов определения экономической эффективности энергосберегающих проектов.

Основные результаты диссертации докладывались на:

- VI Международной научно-практической конференции молодых ученых и студентов в рамках 12-ой международной конференции по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики «Опыт прошлого – взгляд в будущее». - Тула: ТулГУ, 2016 г.;

Публикации. Основные научные результаты диссертационных исследований опубликованы в 6-ти печатных научных трудах, общим объемом 6,5 п.л., лично автора 4,5 п.л., в том числе 4 работы опубликованы в рецензируемых научных изданиях, 2 публикации – по материалам международных научных конференций.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка использованных источников и приложений. Общий объем работы составляет 177 страниц, в том числе 122 страницы основного текста; содержит 46 полных страниц с рисунками и таблицами, 13 страниц списка использованных источников; 44 страницы приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В введении определена актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследования, научная новизна, представлены публикации и апробация результатов диссертационной работы, а также описана ее структура.

В первом разделе обоснована необходимость анализа эффективности теплоизоляционных материалов при проведении мероприятий по модернизации ограждающих конструкций зданий; рассмотрены существующие методы оценки эффективности теплоизоляционных материалов и мероприятий по термомодернизации ограждающих конструкций; определены основные направления при термомодернизации ограждающих конструкций зданий:

- с непосредственным монтажом теплоизоляционного слоя на наружную поверхность ограждающей конструкции;
- «точечное» утепление (теплоизоляция отдельно взятых квартир в многоквартирных зданиях);

- утепление с использованием технологии навесного фасада с вентилируемой воздушной прослойкой.

В таблице 1 представлены теплотехнические и санитарно-гигиенические критерии оценки эффективности термомодернизации с непосредственным монтажом теплоизоляционного слоя на наружную поверхность ограждающей конструкции.

Таблица 1 – Критерии эффективности проектов по утеплению

Теплотехнические	Санитарно-гигиенические
- сопротивление теплопередаче конструкции R_p^{des} , ($\text{м}^2 \cdot \text{°К/Вт}$); -сопротивление паропрооницанию R_{vp}^{des} , $\text{мг}/(\text{м} \cdot \text{с} \cdot \text{Па})$;	- температурный перепад между температурой внутреннего воздуха в помещении и внутренней поверхности ограждающей конструкции Δt_0 , °С ; - сопротивление воздухопроницанию R_{inf}^{des} , $\text{мг}/(\text{м} \cdot \text{с} \cdot \text{Па})$.

Во втором разделе был проведен расчёт всех промежуточных и основных параметров эффективности для четырех различных видов теплоизоляционных материалов при утеплении с непосредственным монтажом теплоизоляционного слоя на наружную поверхность ограждающей конструкции. В качестве целевого объекта выбрано 5-ти этажное панельное жилое здание типовой серии I-464.

Наиболее эффективным материалом для реконструкции является пенополистирол. Расчетные параметры реконструкции с применением пенополистирола представлены в таблице 2.

Таблица 2 - Расчетные параметры для пенополистирола

Параметр	Ед. изм.	Значение
1	2	3
Требуемое сопротивление теплопередаче, R^{req}	$\text{м}^2 \cdot \text{°К/Вт}$	3,3
Сопротивление теплопередаче существующей конструкции, R_c	$\text{м}^2 \cdot \text{°К/Вт}$	1,996
Сопротивление теплопередаче конструкции после утепления, R^{des}	$\text{м}^2 \cdot \text{°К/Вт}$	4,667
Сопротивление паропрооницанию всей конструкции, R_{vp}^0	$\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па/мг}$	6,87
Сопротивление паропрооницанию до плоскости возможной конденсации, R_{vp}^{des}	$\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па/мг}$	1,87
Нормируемое сопротивление паропрооницанию (период с отрицательными среднемесячными температурами), R_{vp2}^{req}	$\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па/мг}$	0,068
Чистый дисконтированный доход, ЧДД	млн. руб	0,658
Индекс доходности, ИД		0,74
Дисконтированный срок окупаемости, $T_{ок}$	лет	13,1

В разделе также рассматривается метод выбора эффективной толщины теплоизоляционного материала с известными теплотехническими характеристиками. Эффективная толщина теплоизоляционного слоя - толщина, при которой достигается максимальный экономический эффект и не нарушается соответствие нормативным теплотехническим параметрам (допустимая толщина теплоизоляционного слоя).

В качестве теплоизоляционного материала выбран экструдированный пенополистирол. С помощью расчета теплотехнических критериев был получен интервал изменения допустимой толщины теплоизоляционного слоя - δ_m - от 0,063 до 0,2 м и построен график изменения нормативного значения сопротивления паропрооницанию R_{vp}^{req} от толщины теплоизоляционного слоя δ_m (Рис. 1). Установлено, что на указанном диапазоне не нарушаются требования к конструкции по паропрооницанию.



Рисунок 1 - График зависимости R_{vp}^{req} от толщины теплоизоляционного слоя δ_m .

В разделе исследована технология «точечного» утепления жилых зданий. Предложена методика определения потенциального повышения температуры внутреннего воздуха t_{int} после проведения «точечного» утепления ограждающих конструкций отдельно взятой квартиры. Были получены выражения для определения этой температуры в зависимости от расположения квартиры в здании:

- квартира верхнего этажа с чердачным перекрытием

$$t_{int} = \frac{Q_m + (t_{ext}^{cp} \cdot (\frac{A_u}{R_u + \frac{\delta_m}{\lambda_m}} + \frac{A_c}{R_c})) + t_{int}^{nod} \cdot \frac{A_{nod}}{R_{nod}} + t_{int}^{nm} \cdot \frac{A_{nm}}{R_{nm}} \cdot \psi_{nm}}{\frac{A_u}{R_u + \frac{\delta_m}{\lambda_m}} + \frac{A_c}{R_c} + \frac{A_{nm}}{R_{nm}} \cdot \psi_{nm} + \frac{A_{nod}}{R_{nod}}}; \quad (1)$$

-квартира первого этажа

$$t_{\text{int}} = \frac{Q_m + (t_{\text{ext}}^{cp} \left(\frac{A_n}{R_n + \frac{\delta_m}{\lambda_m}} + \frac{A_c}{R_c} \right)) + t_{\text{int}}^{nod} \cdot \frac{A_{nod}}{R_{nod}} + t_{\text{int}}^{nl} \cdot \frac{A_{nl}}{R_{nl}} \cdot \psi_{nl}}{\frac{A_n}{R_n + \frac{\delta_m}{\lambda_m}} + \frac{A_c}{R_c} + \frac{A_{nod}}{R_{nod}} + \frac{A_{nl}}{R_{nl}} \cdot \psi_{nl}} ; \quad (2)$$

- квартира общего расположения

$$t_{\text{int}} = \frac{Q_m + (t_{\text{ext}}^{cp} \left(\frac{A_n}{R_n + \frac{\delta_m}{\lambda_m}} + \frac{A_c}{R_c} \right)) + t_{\text{int}}^{nod} \cdot \frac{A_{nod}}{R_{nod}}}{\frac{A_n}{R_n + \frac{\delta_m}{\lambda_m}} + \frac{A_c}{R_c} + \frac{A_{nod}}{R_{nod}}} . \quad (3)$$

где t_{int}^{nm} - внутренняя температура воздуха чердачного помещения, °С;

t_{int}^{nl} - температура воздуха в подвале или подполье, °С;

t_{int}^{nod} - температура воздуха в подъезде, °С;

A_n - площадь наружных стен, м²;

A_{nm} - площадь потолочных перекрытий, м²;

A_{nl} - площадь полов квартиры, м²;

A_{nod} - площадь подъездных стен, м²;

A_c - площадь светопрозрачных ограждающих конструкций, м²;

Ψ - коэффициент, учитывающий расчётный перепад температур для горизонтальных ограждений (для пола – 0,6; для потолка – 0,8).

В результате были получены значения потенциальной температуры воздуха в помещении после утепления стен квартиры пенопластом с теплопроводностью 0,037 Вт/м·°С (Таблица 3) и графики зависимости этой температуры от толщины теплоизоляционного слоя (Рис. 2).

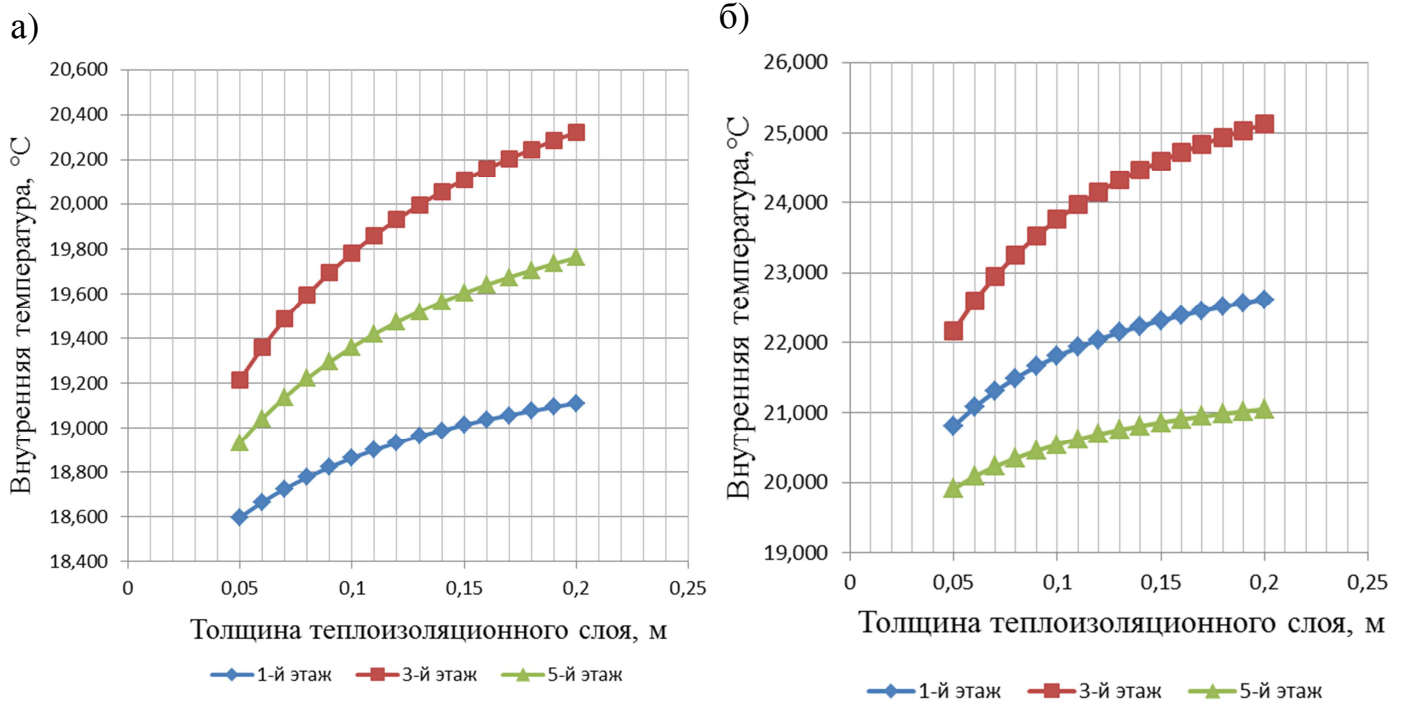
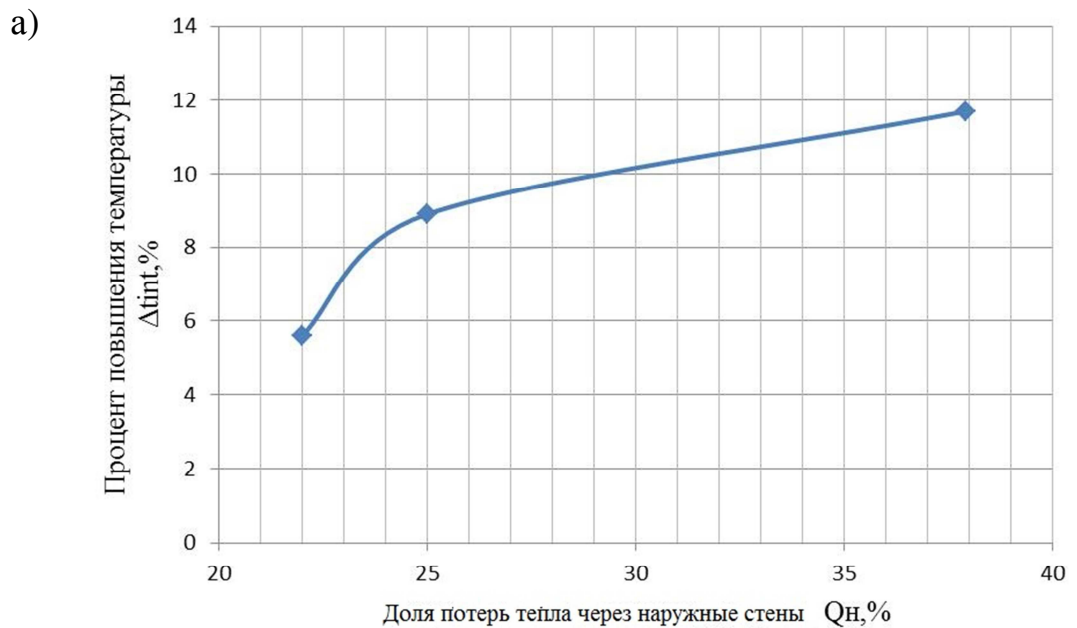


Рисунок 2 - Зависимость t_{int} от δ (а - серия 1-464; б - серия 1-447)

Таблица 3 - Значение температуры внутреннего t_{int} воздуха после проведения «точечного» утепления (серия 1-447).

Расположение квартиры	Ед. изм.	Серия 1-447	Серия 1-464
Угловая квартира 3-го этажа	°C	20,1	24,8
Угловая квартира пятого этажа	°C	19,0	20,9



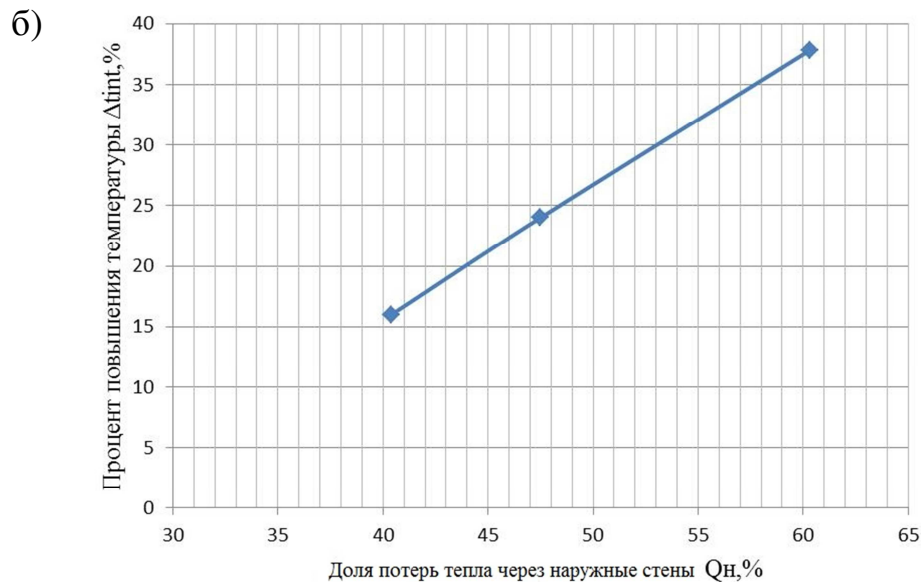


Рисунок 3 - Зависимость повышения температуры $\Delta t, \%$ от доли тепловых потерь через наружные стены $Q_n, \%$:

а - для панельного здания типовой серии 1-464;

б - для кирпичного здания типовой серии 1-447

Установлено, что наибольшее влияние на эффективность "точечного утепления" имеет доля тепловых потерь через наружные стены. Зависимость повышения температуры $\Delta t, \%$ от доли тепловых потерь через наружные стены $Q_n, \%$ для панельного здания типовой серии 1-464 и кирпичного здания типовой серии 1-447 представлены на рисунке 3.

Третий раздел работы посвящен исследованию эффективности систем навесных фасадов с вентилируемой воздушной прослойкой. Для учета влияния крепежных элементов фасада на теплотехническую однородность конструкции проведено моделирование теплового потока через участок конструкции с теплопроводным включением. Определено влияние теплотехнической однородности навесных вентилируемых фасадов на экономическую эффективность. Исследованы процессы переноса влаги и конденсации в конструкции.

Сопротивление теплопередаче конструкции с навесным вентилируемым фасадом определяется по формуле

$$R_{нф} = \frac{1}{a_{int}} + (R_{cm} + R_{ym}) \cdot r + R_{np} + R_o + \frac{1}{a_{ext}}, \quad (4)$$

где R_{cm} - сопротивление теплопередаче наружной стены здания, $m^2 \cdot ^\circ C / Вт$;

R_{ym} - сопротивление теплопередаче слоя утеплителя, $m^2 \cdot ^\circ C / Вт$;

R_{np} - сопротивление теплопередаче воздушной прослойки, $m^2 \cdot ^\circ C / Вт$;

R_o - сопротивление теплопередаче декоративного слоя, $m^2 \cdot ^\circ C / Вт$;

r - коэффициент теплотехнической однородности, обусловленный наличием теплопроводных включений.

Сопротивление теплопередаче воздушной прослойки определяется по формуле

$$R_{np} = \frac{1}{0,5 \cdot a_k + a_l}, \quad (5)$$

где a_k - коэффициент конвективного теплообмена.

Коэффициент лучистого теплообмена a_l

$$a_l = \frac{c_0 \cdot b \cdot \varphi}{\frac{1}{\xi_{вн1}} + \frac{1}{\xi_{вн2}} - 1}, \quad (6)$$

где φ - коэффициент облученности (для воздушных прослоек навесных вентилируемых фасадов равен 1);

c_0 - коэффициент излучения абсолютно черного тела (5,77 Вт/м²·К⁴);

$\xi_{вн1}, \xi_{вн2}$ - относительные коэффициенты излучения материала внутренних стенок воздушной прослойки (согласно табличным данным);

b - корректирующий множитель (для температур, близких к 0°C, $b = 0,8$).

Среднее значение коэффициента конвективного теплообмена a_k для воздушной прослойки

$$a_k = (0,896 + 1,51 \cdot 10^{-3} \cdot t) \cdot \left(\frac{V_{np}^{0,2} \cdot \Delta t^{0,1}}{d^{0,5}} \cdot \varepsilon \right), \quad (7)$$

где Δt - разность между средней температурой воздуха в прослойке и температурой поверхности прослойки, °C;

t_{np}^{cm} - температура поверхности воздушной прослойки, °C;

d - эквивалентный диаметр воздушной прослойки, м;

δ_{np} - ширина воздушной прослойки, м;

ε - коэффициент, характеризующий отношение l/d ;

Скорость воздуха в воздушной прослойке

$$V_{np} = \sqrt{\frac{0,08 \cdot H \cdot (t_{cp} - t_n)}{\sum \xi}}, \quad (8)$$

где H - разность высот от входа воздуха в прослойку до выхода из неё, м;

t_{cp} - средняя температура воздуха в прослойке, °C;

t_n - температура наружного воздуха, °C;

$\sum \xi$ - сумма коэффициентов местных сопротивлений.

Средняя температура воздуха в воздушной прослойке

$$t_{cp} = t_0 - (t_0 - t_n) \cdot \frac{X_0}{H} \cdot (1 - e^{-\frac{H}{X_0}}), \quad (9)$$

где t_0 - предельная температура воздуха в воздушной прослойке, °C;

X_0 - коэффициент, характеризующий высоту, на которой разность температур

$t_0 - t_{np}^{cm}$ становится меньше своего предельного значения $t_n - t_0$ в e раз.

Для определения коэффициента теплотехнической однородности конструкции с навесным фасадом с вентилируемой воздушной прослойкой разработана 3D модель участка конструкции с теплотехническим включением (анкерный болт 120×10 мм и кронштейн 40×40×2 мм) и проанализированы значения тепловых потоков через этот участок для кирпичной стенки, толщиной 0,5 м. (Рис. 4,5). В таблице 4 представлены найденные значения тепловых потоков и коэффициента теплотехнической однородности.

Таблица 4 – Тепловой поток и коэффициент однородности

Параметр	Ед. изм	Сталь	Алюминий
Тепловой поток через участок с кронштейном, $Q_{пр}$	Вт	3,0178	3,1079
Тепловой поток через участок без кронштейна, $Q_{ст}$	Вт	2,8043	2,8043
Коэффициент теплотехнической однородности, r		0,93	0,9

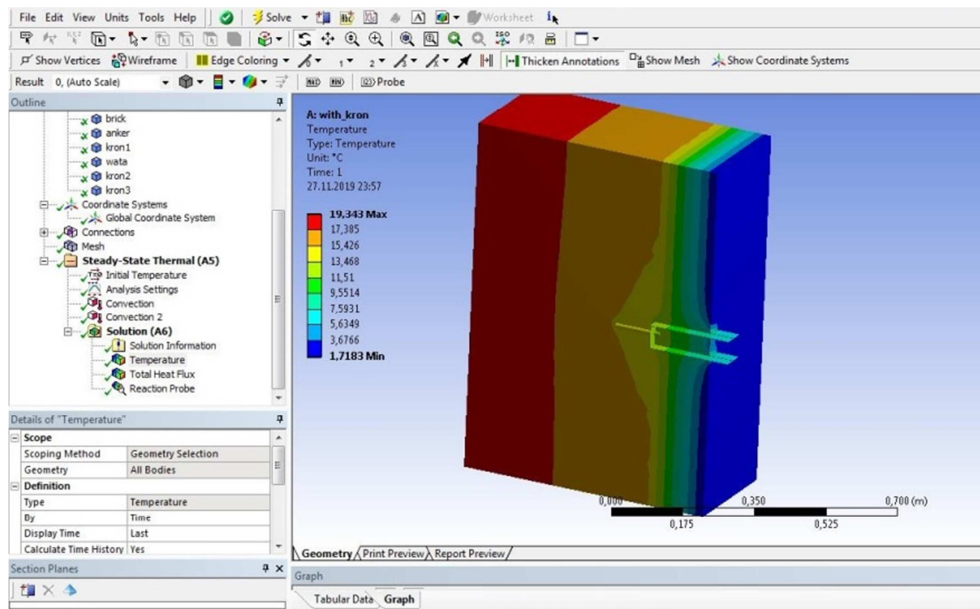


Рисунок 4 – Распределение температур в участке конструкции

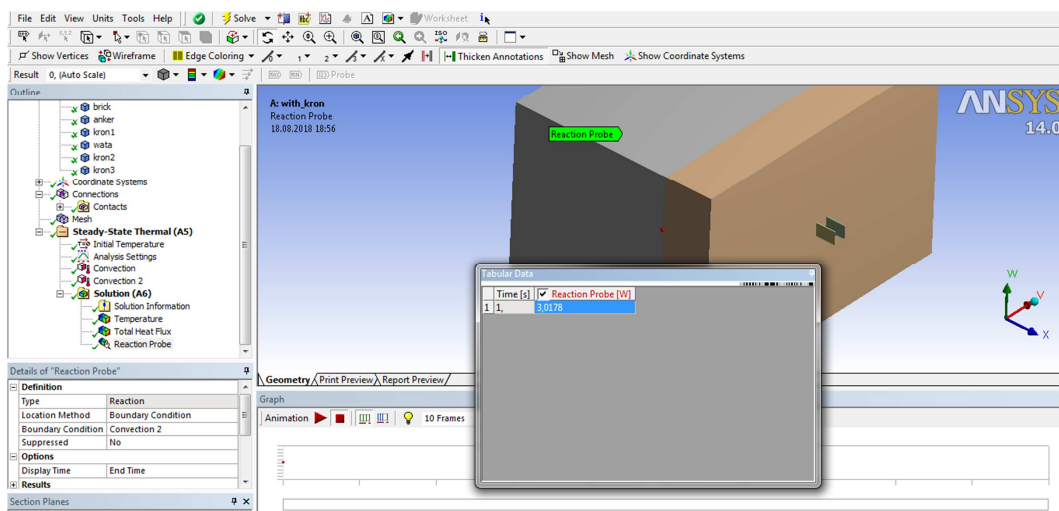


Рисунок 5 – Значение суммарного теплового потока

Коэффициент однородности навесного вентилируемого фасада зависит от количества кронштейнов на 1 м² конструкции и их геометрии (Таблица 5).

Расчет параметров навесного вентилируемого фасада был выполнен для здания типовой серии 1-447, стена - силикатный кирпич 0,5 м (Таблица 6). Навесной фасад – система UKON с толщиной теплоизоляционного слоя 15 см и толщиной воздушной прослойки – 6 см.

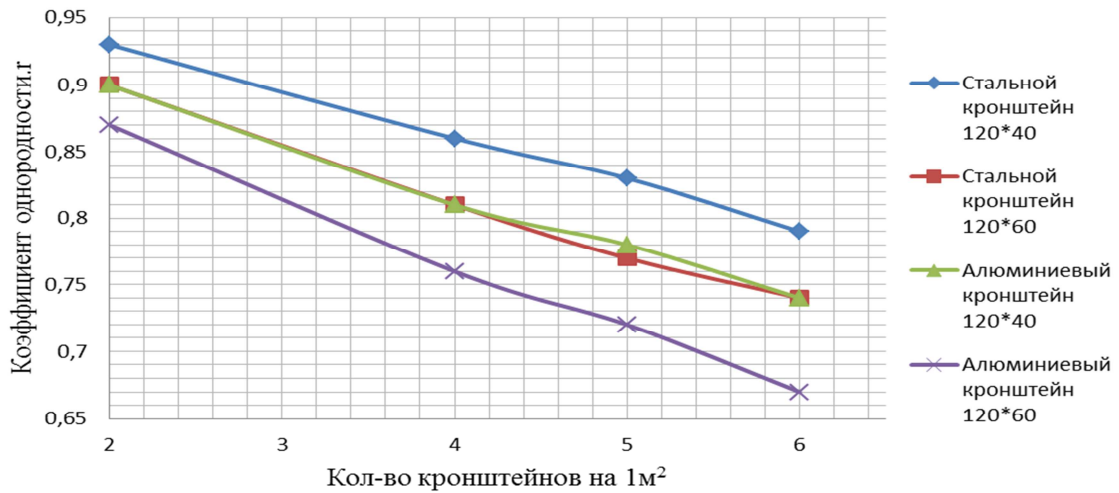
Таблица 5– Коэффициенты однородности r

Кол-во кронштейнов на 1 м ²	Стальной кронштейн		Алюминиевый кронштейн	
	210x40x2 мм с анкерным болтом 120x10 мм	210x60x2 мм с анкерным болтом 120x12 мм	210x40x2 мм с анкерным болтом 120x10 мм	210x60x2 мм с анкерным болтом 120x12 мм
2	0,93	0,9	0,9	0,87
3	0,89	0,85	0,85	0,81
4	0,86	0,81	0,81	0,76
5	0,83	0,77	0,78	0,72
6	0,79	0,74	0,74	0,67

Таблица 6– Параметры системы UKON

Скорость движения воздуха в прослойке, V_{np}	м/с	0,388
Температура поверхности прослойки, t_{np}^{cm}	°С	0,446
Коэффициент X_0	°С	0,259
Средняя температура воздуха в прослойке, t_{cp}	°С	-0,517
Разность температур в прослойке, Δt	°С	-0,963
Расчетная температура, t_0	°С	-0,482
Коэффициент конвективного теплообмена, a_k		2,131
Сопротивление теплопередаче воздушной прослойки, R_{np}	м ² ·°С/Вт	0,348
Сопротивление теплопередаче после утепления, $R_{нф}^{des}$	м ² ·°С/Вт	3,671

Влияние параметров крепежных элементов на коэффициент однородности r отображен на рисунке 6.

Рисунок 6 – Коэффициент однородности r

Далее в разделе был исследован процесс переноса влаги в конструкции с навесным вентилируемым фасадом с использованием графо-аналитического метода Фокина-Власова. Особенностью расчета параметров влагопередачи в системах навесных вентилируемых фасадов является определения e_{ext} - парциального давления водяного пара наружного воздуха. В отличие от конструкций без навесного вентилируемого фасада, для которых e_{ext} определяется по климатическим данным для региона строительства, в конструкциях с навесным вентилируемым фасадом для расчета параметров влагопередачи необходимо использовать значения парциального давления водяного пара в прослойке.

Выражение для определения парциального давления водяного пара в произвольном сечении воздушной прослойки имеет вид

$$\frac{e_x - e_{в.н.}}{e_0 - e_{в.н.}} = e^{-A \cdot x}, \quad (10)$$

где e_0 - парциальное давление водяного пара на входе в прослойку, Па.

Параметр A представляет собой выражение

$$A = \frac{\frac{1}{R_{vp}^{ст}} + \frac{1}{R_{vp}^{дек}}}{\zeta \cdot j}, \quad (11)$$

где j - расход воздуха в воздушной прослойке, кг/ч.

Далее с помощью интегрирования и математического преобразования выражения (12) по dx получим выражение для определения среднего значения парциального давления водяного пара по длине прослойки:

$$e_{cp} = \frac{1}{L} \cdot \int_0^L (e_{в.н.} - (e_{в.н.} - e_0) \cdot e^{-A \cdot x}) dx; \quad (12)$$

$$e_{cp} = e_{в.н.} - (e_{в.н.} - e_0) \cdot \left(\frac{L}{A}\right) \cdot (1 - e^{-AL}). \quad (13)$$

Условие отсутствия конденсации влаги в воздушной прослойке

$$e_L < Et_{в.н.}, \quad (14)$$

где e_L - парциальное давление водяного пара в конце прослойки, Па;

$Et_{в.н.}$ - парциальное давления воздуха при предельной температуре воздуха в прослойке, Па.

Таким образом, при построении графиков паропроницаия в конструкции с навесным вентилируемым фасадом, вместо e_{ext} необходимо использовать e_{cp} . Параметры воздуха в прослойке для панельного здания типовой серии 1-464 представлены в таблице 7 и на рисунке 7.

Таблица 7 – Параметры воздуха в прослойке

Параметр	Ед. Изм.	Зима	Лето	Весна-осень
Средняя температура воздуха в прослойке, t_{cp}	°С	- 5,4	15,8	- 1,0
Скорость движения воздуха в прослойке, V_{np}	м/с	0,39	0,164	0,356
Предельное парциальное давление водяного пара в прослойке, $e_{в.н.}$	Па	534,4	1229	699,5
Среднее парциальное давление водяного пара в прослойке, e_{cp}	Па	486,19	1223	668,86
Парциальное давление водяного пара в конце прослойки, e_l	Па	534,4	1229	699,5
Предельное парциальное давление воздуха в прослойке, $E_{в.н.}$	Па	390	1795,8	561,5

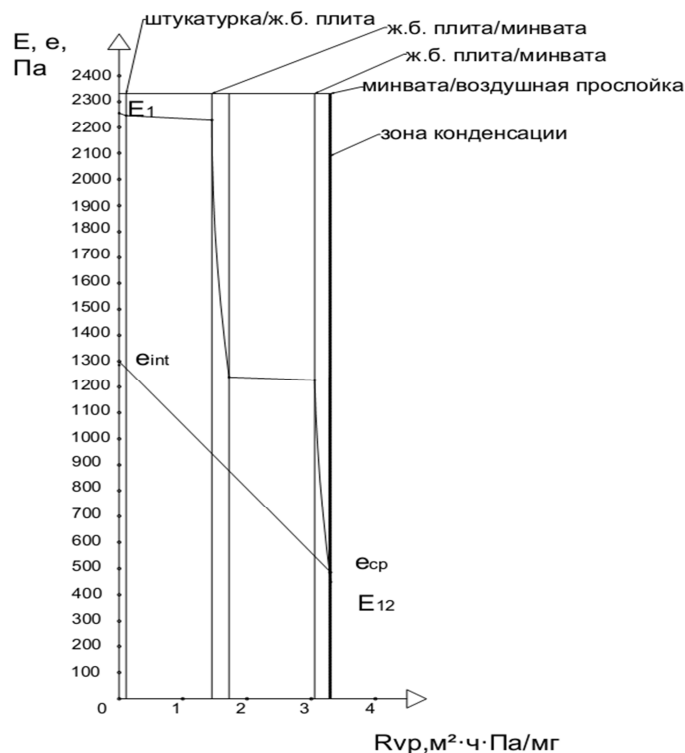


Рисунок 7 – Распределение влаги по слоям конструкции (зима).

Конденсация влаги в ограждающих конструкциях здания типовой серии 1-464 возможна в самом теплоизоляционном слое вблизи наружной поверхности. Также согласно данным таблицы 7 можно сделать вывод, что условие (17) не соблюдается для рассматриваемой конструкции в период влагонакопления.

Так как эффективность «точечного утепления» определяется по повышению внутренней температуры воздуха, то существует необходимость точного определения существующей температуры в помещении. Для этого был проведен многофакторный эксперимент, при котором в 9-ти точках помещений были проведены замеры температур. Целью эксперимента было установление точки, в которой значение температуры ближе всего к среднеобъемному значению.

Выходной параметр Y рассчитывается по формуле

$$\alpha_k = (Nu \cdot \lambda) / h, \quad (15)$$

где λ - коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·°С);

Nu – критерий Нуссельта;

Δt - разность температуры воздуха и отопительного прибора, °С;

h – высота точки замера, м;

d – удаление точки замера от радиатора, м.

В таблице 8 представлены значения переменных в натуральном и условном масштабах.

Таблица 8- Уровни переменных в натуральном и условном масштабах

Компоненты в натуральном масштабе	Фактор	Средний уровень, нат. ед.	Шаг вариации ΔX , нат. ед.	Значение уровней переменных, нат. ед. соответственно с усл.ед.		
				-1	0	1
Δt	X_1	29	1,25	27,75	29	30,25
h	X_2	1,25	0,75	0,5	1,25	2
d	X_3	2,8	2,3	0,5	2,8	5,1

В результате составления матрицы планирования, перемножения компонентов и определения коэффициентов регрессии была получена следующая зависимость

$$\alpha_k = 4,5039 + 0,053 \cdot \Delta t + 0,4987 \cdot h + 0,00089 \cdot d - 0,00089 \cdot \Delta t^2 - 0,0407 \cdot h^2 - 0,000037 \cdot d^2 + 0,00596 \cdot \Delta t \cdot h + 0,000037 \cdot \Delta t \cdot d + 0,000185 \cdot h \cdot d \quad (16)$$

Установлено, что наиболее достоверное значение температуры можно получить в точке, находящейся на удалении 5,1 м от радиатора и на высоте 1,25 м, так как именно в этой точке значение разности температур Δt ближе всего к среднеобъемному значению.

В четвертом разделе получены выражения для определения экономических критериев эффективности при проведении утепления ограждающих конструкций зданий:

- чистый дисконтированный доход ЧДД

$$ЧДД = \left(\frac{\delta_m \times (t_{int} - t_{ext}^{cp}) \times A_{cm} \times z \times c_{m.э.}}{4,19 \times 10^9 \times \lambda_m \times R_{до}^{des} \times (R_{до}^{des} + \frac{\delta_m}{\lambda_m})} \right) \times \frac{1 - (\frac{1}{1+E_p})^{T_{ок}}}{1 - (\frac{1}{1+E_p})} - A_{cm} \cdot (\delta_m \cdot c_{m.м.} + c_m); \quad (17)$$

- индекс доходности ИД

$$ИД = \frac{\delta_m \times (t_{int} - t_{ext}^{cp}) \times z \times c_{m.э.} \times (1 - (\frac{1}{1+E_p})^{T_{ок}})}{4,19 \times 10^9 \times \lambda_m \times R_{до}^{des} \times (R_{до}^{des} + \frac{\delta_m}{\lambda_m}) \times (\delta_m \times c_{m.м.} + c_m) \times (1 - (\frac{1}{1+E_p}))}; \quad (18)$$

- дисконтированный срок окупаемости $T_{ок}$

$$T_{ок} = \frac{\ln(1 - \frac{4,19 \times 10^9 \times \lambda_m \times R_{до}^{des} \times (R_{до}^{des} + \frac{\delta_m}{\lambda_m}) \times (\delta_m \times c_{m.м.} + c_m) \cdot (1 - (\frac{1}{1+E_p}))}{\delta_m \times (t_{int} - t_{ext}^{cp}) \times z \times c_{m.э.}})}{\ln(\frac{1}{1+E_p})}, \quad (19)$$

где δ_m - толщина теплоизоляционного материала, м;

λ_m - теплопроводность теплоизоляционного материала, Вт/м·°С;

$c_{m.м.}$ - удельная стоимость 1 м³ теплоизоляционного материала, руб/м³;

c_m - удельная стоимость монтажа 1 м² теплоизоляционного материала (с учётом декоративного слоя), руб/м²;

A_{cm} - площадь изолируемой поверхности, м²;

$c_{m.э.}$ - удельная стоимость тепловой энергии, руб;

z_{ht} - продолжительность отопительного периода, с;

t_{ext}^{cp} - средняя температура воздуха в отопительный период, °С;

$R_{до}^{des}$ - сопротивление теплопередаче конструкции до утепления, м²·°С/Вт.

Получены графики зависимости экономических параметров эффективности от толщины теплоизоляционного слоя (Рис. 8).

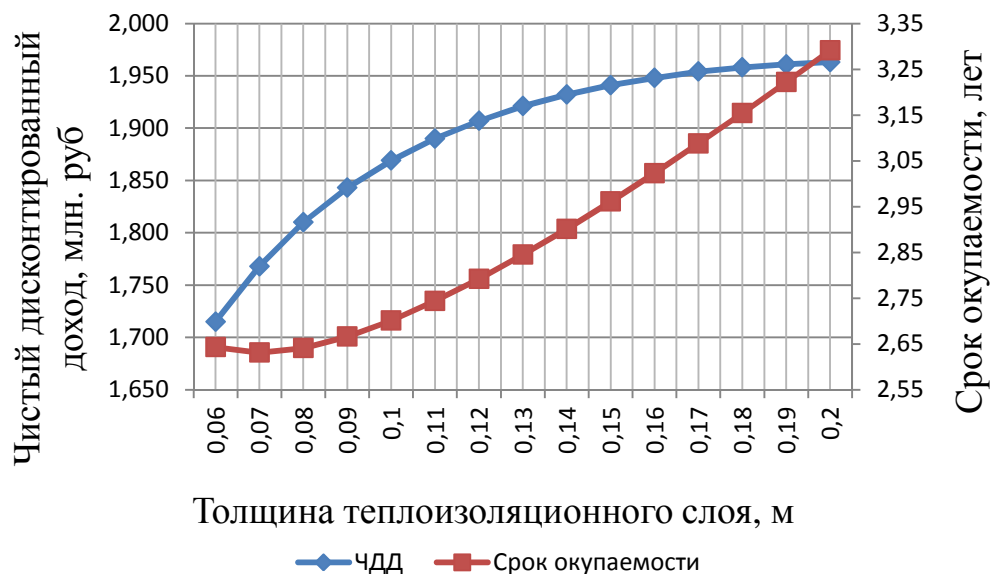


Рисунок 8 – Графики зависимости экономических параметров эффективности от толщины теплоизоляционного слоя для реконструкции здания

Эффективная толщина теплоизоляционного слоя - 0,07 м.

В разделе получены значения параметров экономической эффективности для реконструкции с использованием навесных вентилируемых фасадов (Табл. 9) и установлено влияние степени теплотехнической однородности на экономическую эффективность реконструкции (Рис. 9).

Таблица 9 – Параметры экономической эффективности для реконструкции с использованием навесных вентилируемых фасадов

Параметр	Ед. изм.	Значение
Капитальные затраты, К	руб	3049177,95
Экономический эффект, Э	руб	254842,50
Чистый дисконтированный доход, ЧДД	руб	1652243,88
Индекс доходности, ИД		1,54
Дисконтированный срок окупаемости, $T_{ок}$	лет	15,4

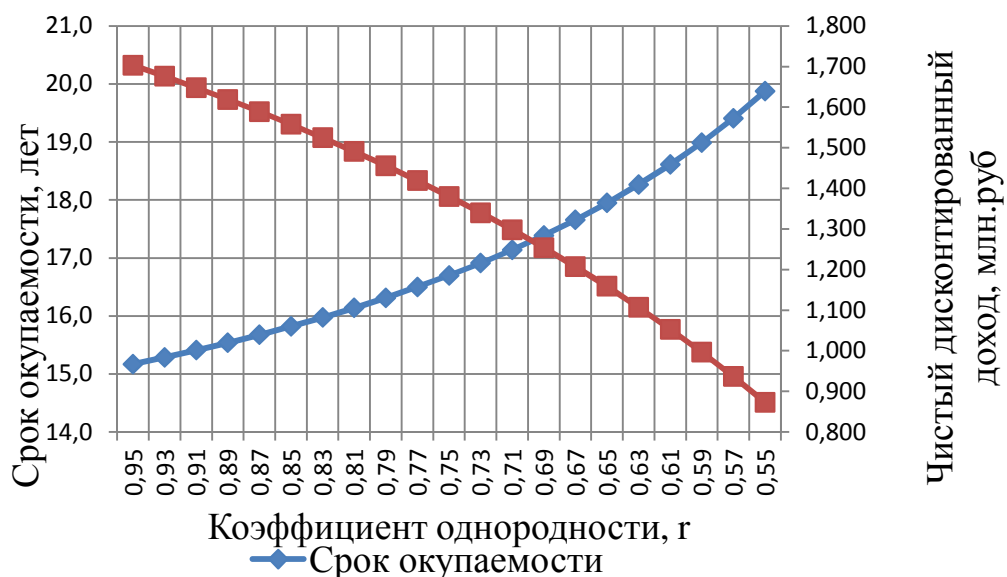


Рисунок 9 – Влияние r на экономическую эффективность

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе были решены следующие задачи:

1. Получены теплотехнические, санитарно-гигиенические и экономические критерии оценки эффективности теплоизоляционных материалов при термомодернизации ограждающих конструкций. Произведен анализ эффективности

применения различных теплоизоляционных материалов при модернизации тепловой защиты зданий типовых серий 1-464 и 1-447.

2. Разработан метод определения эффективности использования теплоизоляционных материалов при «точечном» утеплении. Получены графики зависимости повышения температуры внутреннего воздуха в помещении от толщины и теплопроводности материала теплоизоляционного слоя. Исследованы процессы распределения температуры в помещении с целью наиболее достоверного анализа эффективности «точечного» утепления.

3. Исследованы процессы тепло- и влагопередачи в конструкциях с навесными вентилируемыми фасадами. Исследовано влияние крепежных элементов конструкции на теплотехническую и экономическую эффективность конструкции. Разработана модель участка ограждающей конструкции с вентилируемым фасадом для исследования процессов теплопередачи через участки с крепежными элементами.

4. Получено выражение для определения среднего значения парциального давления водяного пара по длине воздушной прослойки в ограждающей конструкции с навесным вентилируемым фасадом.

5. Определены параметры экономической эффективности рассматриваемых способов термомодернизации для зданий типовых серий 1-447 и 1-464. Определена степень влияния теплотехнической однородности на экономическую эффективность навесных фасадов с вентилируемой воздушной прослойкой. Установлено, что увеличение количества крепежных элементов может привести к снижению экономической эффективности до 25%.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- публикации в рецензируемых научных изданиях:

1. **Копейка, Д.В.,** Гридин, С.В. Определение параметров влагопередачи и расположения плоскости возможной конденсации в системах навесных фасадов с вентилируемой воздушной прослойкой [Текст] / Д.В. Копейка, С.В. Гридин // Современное промышленное и гражданское строительство. – Макеевка: ДонНАСА, 2019. - Том 15. - № 1. – С. 5–11. *(Получено выражение для определения среднего по длине прослойки значения парциального давления насыщенного водяного пара).*

2. **Копейка, Д.В.** Коэффициент теплотехнической однородности ограждающей конструкции с навесным фасадом с вентилируемой воздушной прослойкой [Текст] / Д.В. Копейка // Современное промышленное и гражданское строительство. – Макеевка: ДонНАСА, 2019. - Том 15. - № 1. – с. 13 - 21.

3. **Копейка, Д.В.** Теплотехническая однородность навесных вентилируемых фасадов и экономическая эффективность [Текст] / Д.В. Копейка // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Современные строительные материалы. – Макеевка: ДонНАСА, 2019. - № 1 – С. 107-112.

4. **Копейка, Д.В.,** Гридин, С.В., Онищенко, С.А. Анализ параметров пожароопасности и тепловой защиты фасадов с вентилируемым воздушным зазором [Текст] / Д.В. Копейка, С.В. Гридин, С.А. Онищенко // Вестник Академии

гражданской защиты» : научный журнал. – Донецк: ГОУВПО «Академия гражданской защиты» МЧС ДНР, 2019. – Вып. 2(18). – С. 114-120. (*Проведено исследование навесных вентилируемых фасадов с точки зрения их пожарной безопасности и теплотехнической эффективности*).

- публикации по материалам конференций:

5. **Копейка, Д.В.** Определение параметров теплового комфорта в помещении при регулировании тепловой нагрузки централизованного теплоснабжения [Текст] // Д.В. Копейка / Материалы 6-ой международной научно-практической конференции молодых ученых и студентов в рамках 12-ой международной конференции по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики «Опыт прошлого – взгляд в будущее». - Тула: ТулГУ, 2016. - С. 255-258.

6. **Копейка, Д.В.** Проблемы повышения энергоэффективности жилых и административных зданий относящихся к типовым сериям [Текст] / Д.В. Копейка / Материалы 6-ой международной научно-практической конференции молодых ученых и студентов в рамках 12-ой международной конференции по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики «Опыт прошлого – взгляд в будущее». – Тула: ТулГУ - 2016. С.- 249-255.

АННОТАЦИЯ

Копейка Д.В. – Повышение эффективности использования теплоизоляционных материалов при утеплении ограждающих конструкций зданий – Рукопись

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.03 - Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение - ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», г. Макеевка, 2020.

Диссертация посвящена исследованию энергоэффективности теплоизоляционных материалов при различных вариантах термомодернизации ограждающих конструкций зданий.

В первом разделе рассмотрена необходимость анализа эффективности теплоизоляционных материалов при проведении мероприятий по модернизации ограждающих конструкций зданий, выделены основные направления термомодернизации ограждающих конструкций.

Во втором разделе произведен расчет параметров эффективности четырех различных теплоизоляционных материалов на примере жилого здания типовой серии 1-464 и определен наиболее эффективный материал для реконструкции – пенополистирол, представлен метод определения эффективной толщины теплоизоляционного материала. В разделе предложен метод определения эффективности «точечного» утепления для жилых зданий типовых серий 1-464 и 1448.

Третий раздел посвящен исследованию эффективности навесных вентилируемых фасадов. В разделе предложена методика определения

эффективности этой системы с учетом наличия теплопроводящих включений на основании разработанной модели участка конструкции. В разделе также исследован процесс переноса влаги в вентилируемых фасадах. Предложено выражение для определения среднего значения парциального давления водяного пара по длине воздушной прослойки.

В четвертом разделе получены выражения для определения экономических критериев эффективности, исследовано влияние различных параметров термомодернизации на экономическую эффективность.

Ключевые слова: теплоизоляционный материал, эффективность, термомодернизация, теплотехническая однородность.

ABSTRACT

Kopeika D.V. – Effectiveness increase of using heat-insulating materials in building envelopes.

Thesis submitted for the scientific degree of Candidate of Technical Science in specialty 05.23.03 – Heat supply, ventilation, conditioning, gas supply and lighting – Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, Makeevka, 2020.

Thesis is devoted to research of efficiency of heat-insulating materials for different ways of thermal modernization of building envelope.

The first section introduces the importance of efficiency analysis of heat insulating materials during building envelope modernization and highlights the main ways of thermal modernization of building envelope.

The second section represents the estimation of efficiency parameters of four heat-insulating materials for residential building of 1-464 series and defines the most efficient - expanded polystyrene, introduces the method of estimation of efficient

thickness of heat-insulating material. The section represents the method of efficiency defining of “point” heat insulation for residential building of 1-464 and 1-448 series.

The third section is devoted to research of efficiency of ventilation facades. The section introduces the method of efficiency analysis for this system that takes to account the presence of thermal inclusions. The method is based on the developed 3D model of construction with thermal inclusion. The process of vapor transfer in ventilated facades was discovered in this section. The expression for estimation of partial pressure in ventilated layer was also introduced.

The fourth section provides the expressions for parameters of economic efficiency of thermal modernization. Also the section discovers the influence of different thermal modernization parameters on economic efficiency.

Keywords: heat-insulating material, thermal modernization, efficiency, heat engineering uniformity.