

Рукопись

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»

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
к.т.н., доцент
Гридин С.В.

Гридин

Идентичность всех экземпляров заверена
Ученый секретарь диссертационного совета
Д 01.005.01

3.В. Удовиченко



Донецк – 2020 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
РАЗДЕЛ 1. АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ПРОЕКТАХ.....	
1.1 Тепловая изоляция с непосредственным монтажом теплоизоляционного слоя на наружную поверхность ограждающей конструкции.....	11
1.2 «Точечное» утепление	21
1.3 Утепление с использованием навесного фасада с вентилируемой воздушной прослойкой.....	26
1.4 Критерии оценки экономической эффективности мероприятий по утеплению ограждающих конструкций зданий.....	30
1.5 Выводы по разделу.....	34
1.6 Задачи исследования	36
РАЗДЕЛ 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УТЕПЛЕНИЯ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ НЕПОСРЕДСТВЕННОМ МОНТАЖЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА НАРУЖНУЮ ПОВЕРХНОСТЬ	
2.1 Целевой объект.....	38
2.2 Формирование входных и выходных данных для анализа эффективности тепловой изоляции ограждающих конструкций.....	39
2.3 Определение допустимых и эффективных значений толщины теплоизоляционного слоя δ_t	42
2.3.1 Критерии выбора эффективной толщины теплоизоляционного материала.....	43
2.3.2 Допустимая и эффективная толщина теплоизоляционного материала....	48
2.3.3 Расчёт эффективной толщины теплоизоляционного слоя для заданной конструкции.....	48

2.3.4 Предварительные ограничения искомого параметра – толщины теплоизоляционного слоя.....	49
2.3.5 Определения допустимого интервала толщины теплоизоляционного слоя согласно теплотехническим и санитарно- гигиеническим критериям.....	49
2.4 Определения эффективности теплоизоляционных материалов при «точечном» утеплении.....	50
2.4.1 Определение сопротивления теплопередаче.....	51
2.4.2 Определение температуры внутреннего воздуха.....	54
2.4.3 Формирование алгоритма определения температуры внутреннего воздуха при «точечном» утеплении.....	56
2.4.4 Примеры расчёта температуры внутреннего воздуха t_{int} после «точечного утепления».....	57
2.4.5 Анализ результатов расчёта	64
2.5 Выводы по разделу.....	66
РАЗДЕЛ 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ НАВЕСНЫХ ФАСАДОВ С ВЕНТИЛИРУЕМОЙ ВОЗДУШНОЙ ПРОСЛОЙКОЙ ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ.....	68
3.1 Сопротивление теплопередаче воздушной прослойки.....	68
3.2 Коэффициент теплотехнической однородности.....	73
3.3 Расчета эффективности навесного вентилируемого фасада	74
3.4 Определение коэффициента теплотехнической однородности r	76
3.5 Результаты расчета параметров эффективности навесного вентилируемого фасада	81
3.6 Влияние степени однородности системы навесного вентилируемого фасада на эффективность его применения.....	83
3.7 Влажностный режим навесного фасада с вентилируемой воздушной прослойкой.....	86
3.7.1 Определение расположения плоскости возможной конденсации.....	86

3.7.2 Определение сопротивления паропроницанию элементов конструкции с навесным фасадом с вентилируемой воздушной прослойкой.....	88
3.7.3 Влагопередача в конструкции с воздушной прослойкой.....	89
3.7.4 Расчет влажностного режима системы навесного фасада с вентилируемой воздушной прослойкой для зданий типовых серий I-447 и I-464.....	91
3.8 Определение фактических параметров теплового комфорта в помещении..	101
3.9 Выводы по разделу.....	111
РАЗДЕЛ 4. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ	
ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ	
ВАРИАНТАХ МОДЕРНИЗАЦИИ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ.....	113
4.1 Определение эффективной толщины теплоизоляционного слоя при непосредственном монтаже на наружную поверхность ограждающей конструкции.....	114
4.2 Навесной фасад с вентилируемой воздушной прослойкой.....	116
4.3 Влияние степени однородности системы навесного вентилируемого фасада на эффективность его применения.....	117
4.4 Выводы по разделу.....	120
ВЫВОДЫ.....	121
Список литературы.....	123
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	136
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	155
ПРИЛОЖЕНИЕ В.....	159
ПРИЛОЖЕНИЕ Г.....	163
ПРИЛОЖЕНИЕ Д.....	170
ПРИЛОЖЕНИЕ Е.....	175
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж.....	176

ВВЕДЕНИЕ

Тенденция к повышению стоимости энергетических ресурсов существует в мире на протяжении десятилетий. Это привело к тому, что интерес к энергосберегающим технологиям возрос как на законодательном уровне, так и в частной сфере. В результате возникло целое направление по исследованию объектов различного назначения на предмет их энергетической эффективности. Одним из наиболее популярных направлений энергосбережения является модернизация тепловой защиты ограждающих конструкций зданий.

В нашей стране большинство жилых и общественных зданий не соответствует современным стандартам энергоэффективности. Особое место среди жилого фонда нашей страны занимают здания типовых серий, возводившиеся с 1959 по 1985 год. Доля таких зданий превышает 50 %. Ограждающие конструкции зданий типовых серий не соответствуют современным нормам по тепловой защите. В связи с этим возникает необходимость в модернизации тепловой защиты существующих зданий и проектировании тепловой защиты новых зданий с учетом современных стандартов энергосбережения. Т.к. в нашей стране стоимость энергетических ресурсов относительно невысока, по сравнению со среднемировыми, а теплоизоляционные материалы и технологии достаточно дорогостоящи, существует необходимость в детальном анализе энергосберегающих мероприятий на предмет их эффективности.

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 Харитонова А.Ю.

Исследованию современных способов энергосбережения в зданиях и сооружениях посвящены работы Alvaro de Gracia, Luisa F. Cabeza, Lai, C.-M., Wang, Y.-H., 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.

Целью данного исследования является повышение эффективности различных методов термомодернизации ограждающих конструкций зданий путем усовершенствования методов оценки энергоэффективности

используемых теплоизоляционных материалов. При этом были поставлены следующие **задачи**:

- 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.

Объектом исследования является 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.

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.

Достоверность. 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.

На защиту выносятся:

- 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.

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 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.

1. АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ПРОЕКТАХ

Одним из основных направлений энергосбережения является усовершенствование тепловой изоляции зданий и сооружений. Разработка энергосберегающих мероприятий по усовершенствованию тепловой изоляции может проводиться на стадии проектирования целевого объекта и при его реконструкции. При этом эффективность энергосберегающего мероприятия в наибольшей степени зависит от выбора теплоизоляционного материала или конструкции. На сегодняшний день существует широкая номенклатура теплоизоляционных материалов. Теплоизоляционные материалы отличаются по физическим параметрам (плотность, жёсткость, пористость и др.), по теплотехническим параметрам (теплопроводность, теплоустойчивость, паропроницание и др.), по долговечности, по экологичности и по стоимости.

В настоящее время наибольшее распространение получили три способа утепления ограждающих конструкций зданий:

- изоляция 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.

Вышеперечисленные варианты усовершенствования тепловой изоляции имеют свои преимущества и недостатки, а также особенности определения теплотехнической и экономической эффективности.

1.1 Тепловая изоляция с непосредственным монтажом теплоизоляционного слоя на наружную поверхность ограждающей конструкции.

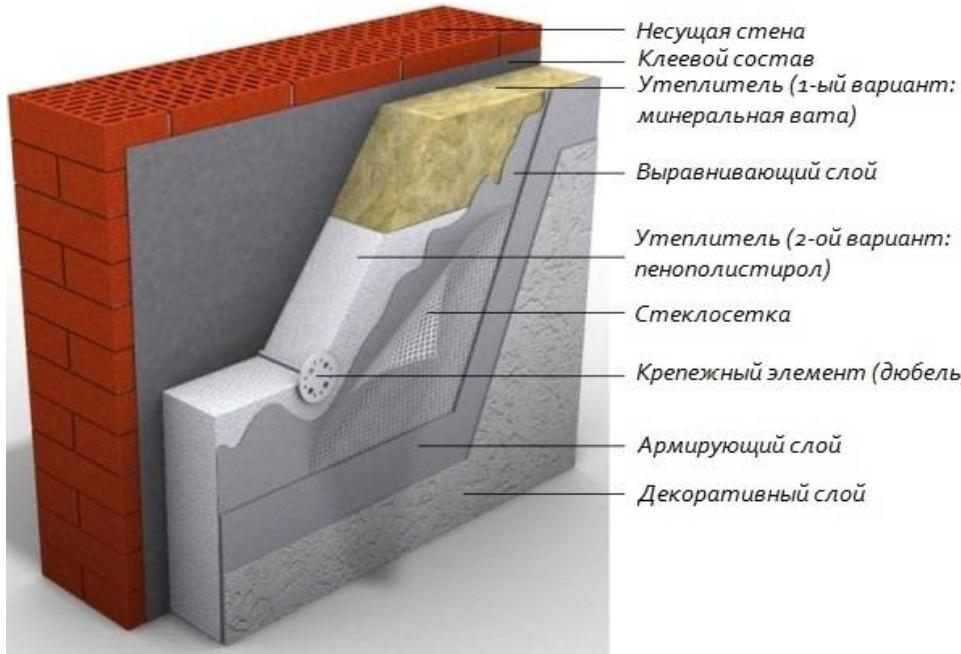


Рисунок 1.1 - Тепловая изоляция с непосредственным монтажом

При таком способе усовершенствования тепловой изоляции теплоизоляционный материал наносится на наружную поверхность ограждающих конструкций (рис. 1.1) либо при помощи крепежных элементов (пластмассовый дюбель), либо при помощи различных kleящих составов. После этого проводится декоративная отделка наружной поверхности. При таком способе монтажа используются теплоизоляционные материалы высокой плотности, как правило, полимерные (различные пенопласти и пенополистиролы, пенополиуретан, пеноизол) [29,37,59] или минераловатные плиты повышенной плотности [29, 59].

Преимущества такого способа утепления:

- простота монтажа;
- широкий спектр возможных теплоизоляционных материалов для реконструкции;
- возможность снижения тепловой нагрузки на отопления после реконструкции.

Недостатки:

- степень горючести некоторых полимерных теплоизоляционных материалов ограничивает возможность их использования для утепления ограждающих конструкций;
- необходимость детального анализа эффективности при выборе теплоизоляционного материала для реконструкции из-за широкого диапазона технических характеристик и различной стоимости;
- монтаж дополнительного теплоизоляционного слоя приводит к увеличению влагонакопления в конструкции.

Указанные недостатки непосредственного монтажа теплоизоляционного слоя определяют необходимость установления определенных критериев эффективности, с помощью которых можно оценить влияние технических характеристик теплоизоляционного материала на теплотехнику ограждающей конструкции и на экономическую эффективность мероприятия по усовершенствованию тепловой защиты.

Главным теплотехническим критерием эффективности теплоизоляционного материала является коэффициент теплопроводности.

Согласно [63], коэффициент теплопроводности λ является физическим параметром вещества, который характеризует интенсивность процесса теплопроводности в веществе и численно равен плотности теплового потока при градиенте температур, равном единице. Коэффициент теплопроводности λ входит в математическое выражение закона Фурье (1.1), на котором, в свою очередь, основывается уравнение теплопроводности (1.2)

$$q = -\lambda \cdot \operatorname{grad}T; \quad (1.1)$$

$$\Delta Q_{men,l} = -\operatorname{div}q\Delta V\Delta\tau, \quad (1.2)$$

где q – плотность теплового потока, Вт/м²;

ΔV – объем бесконечно малого тела, м³;

$\Delta\tau$ – элементарный промежуток времени, с;

ΔQ_{men} – количество теплоты, подведённое к телу, Вт;

λ – коэффициент теплопроводности, Вт/м·°С.

Теплопроводность материала зависит от температуры вещества, структуры, плотности, увлажнения. Расчётное значение коэффициента теплопроводности для обычных условий приводятся в таблицах теплофизических свойств материалов. Для некоторого диапазона температур теплопроводность многих материалов определяется согласно следующей зависимости

$$\lambda = \lambda_0 \cdot (1 + \beta \cdot T), \quad (1.3)$$

где T – температура, °С

λ_0, β - постоянные, определяемые опытным путём.

Для анализа теплотехнических характеристик теплоизоляционных материалов при расчёте энергосберегающих проектов используют термическое сопротивление или сопротивление теплопередаче R .

Согласно [63], термическое сопротивление – это величина, равная отношению разности температур двух изотермических поверхностей и плотности теплового потока в какой-либо точке на одной из этих поверхностей

$$R = \frac{T_{cl} - T_{cn}}{q}, \quad (1.4)$$

где $T_{cl,n}$ – температуры поверхностей стенки, °С.

С учётом (1.1) получим выражение для плоской стенки

$$R = \frac{\delta}{\lambda}. \quad (1.5)$$

При расчёте R для ограждающих конструкций необходимо также учитывать два внешних термических сопротивлений

$$R_{a1} = \frac{T_{\infty 1} - T_{c1}}{q} = \frac{1}{a_1}; \quad (1.6)$$

$$R_{a2} = \frac{T_{c2} - T_{\infty 2}}{q} = \frac{1}{a_2}, \quad (1.7)$$

где T_{c1} – температура поверхности, соприкасающейся с наружной средой, °C;

T_{c2} – температура поверхности, соприкасающейся с внутренней средой, °C;

$T_{\infty 1,2}$ – температура воздуха внутри и снаружи помещения, °C;

Таким образом, выражение для определения полного термического сопротивления ограждающей конструкции принимает вид

$$R = \frac{1}{a_{int}} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{a_{ext}}. \quad (1.8)$$

С учётом того, что ограждающие конструкции зданий могут иметь несколько слоёв материалов с различными теплотехническими показателями, выражение (1.8) принимает вид

$$R = \frac{1}{a_{int}} + \sum_{n=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{a_{ext}}, \quad (1.9)$$

где δ_i – толщина i -го слоя, м.

Основной задачей проектирования тепловой защиты здания является приведение параметров энергоэффективности в соответствие с существующими стандартами. Рассчитываемая при проектировании величина R сопоставляется с нормативным значением. Таким образом, можно сделать вывод касательно эффективности рассматриваемого мероприятия.

При расчёте сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции должно выполняться следующее условие

$$R_p \geq R^{req}, \quad (1.10)$$

где R^{req} - нормируемое сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции, ($\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$).

Определяется в зависимости от градусо-суток отопительного периода, D_d , $^\circ\text{C} \cdot \text{сут}$

$$D_d = (t_{int} - t_{ht}) \cdot z_{ht}, \quad (1.11)$$

где t_{int} – расчётная средняя температура внутреннего воздуха здания, $^\circ\text{C}$ [100];

t_{ht} – средняя температура наружного воздуха [99];

z_{ht} – продолжительность отопительного периода, сут.

Определив фактическое значение сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции с учётом дополнительной тепловой изоляции, необходимо сопоставить его с нормативным значением сопротивления теплопередаче, определённого для данного типа здания при существующих климатических параметрах и продолжительности отопительного периода. Если условие 1.10 не выполняется, то дальнейший расчёт не имеет смысла, т.к. в таком случае осуществление энергосберегающего мероприятия не приведёт ограждающую конструкцию в соответствие с существующими стандартами. Однако расчёт можно продолжить в том случае, если целью мероприятия не является приведение конструкции к современным стандартам энергосбережения.

Как в холодный период года, так и в период с положительными температурами наружного воздуха через ограждающие конструкции здания осуществляется перенос влаги в виде насыщенного пара. Материалы ограждающей конструкции обладают свойством противодействовать переносу насыщенного пара. Это свойство называется сопротивление паропроницанию. В зависимости от таких факторов, как температура и влажность внутреннего и наружного воздуха, парциального давления насыщенного водяного пара и сопротивления паропроницанию материалов в ограждающей конструкции здания на некотором расстоянии от внутренней поверхности происходит конденсация

водяного пара. При этом происходит накопление влаги внутри ограждающей конструкции на протяжении периода конденсации. И только после повышения температуры наружного воздуха происходит обратный процесс испарения накопившейся влаги. Как правило, процесс конденсации и накопления влаги происходит в период с отрицательными среднемесячными температурами, а испарение – с положительными.

При расчёте влагонакопления в ограждающих конструкциях используют такое понятие, как плоскость возможной конденсации, т.е. плоскость, в которой вероятнее всего возможно выпадение влаги в период с отрицательными среднемесячными температурами. Расположение плоскости возможной конденсации зависит от типа ограждающей конструкции и наличия внутреннего теплоизоляционного слоя. В однослойных конструкциях (без внутреннего теплоизоляционного слоя) таких, как кирпичная кладка, однослочная панель и тп., плоскость возможной конденсации находится на расстоянии 2/3 от внутренней поверхности ограждающей конструкции. В многослойных конструкциях с внутренним теплоизоляционным слоем (трёхслойная железобетонная панель и др.) плоскость возможной конденсации находится на внутренней поверхности теплоизоляционного слоя.

Сопротивление паропроницанию многослойной ограждающей конструкции находится по формуле

$$R_{vp}^n = \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\mu_i}, \quad (1.12)$$

где δ_i – толщина i -го слоя ограждающей конструкции, м;

μ_i – расчётный коэффициент паропроницания материала i -го слоя ограждающей конструкции, мг/(м·ч·Па).

Для определения нормативных показателей расчёт сопротивления паропроницанию ограждающей конструкции ведётся от внутренней поверхности до плоскости возможной конденсации.

Сопротивление паропроницанию ограждающей конструкции до плоскости возможной конденсации R_{vp}^{des} должно быть не меньше наибольшего из следующих нормируемых сопротивлений паропроницанию – R_{vp1}^{req} и R_{vp2}^{req} – нормируемого сопротивления паропроницанию из условия недопущения накопления влаги за годовой период и нормируемого сопротивления паропроницанию из условия ограничения накопления влаги за период с отрицательными среднемесячными температурами.

Численные значения R_{vp1}^{req} и R_{vp2}^{req} определяются по формуле

$$R_{vp1}^{req} = (e_{int} - E) \cdot R_{vp}^{\delta} / (E - e_{ext}); \quad (1.13)$$

$$R_{vp2}^{req} = \frac{0,0024 \cdot z_0 \cdot (e_{int} - E_0)}{\rho_w \cdot \delta_w \cdot \Delta w_{aw} + \eta}, \quad (1.14)$$

где e_{int} – парциальное давление водяного пара внутреннего воздуха, Па;

$$e_{int} = (\varphi_{int} / 100) \cdot E_{int}, \quad (1.15)$$

E_{int} – парциальное давление насыщенного водяного пара , Па, при t_{int} ;

φ_{int} – относительная влажность внутреннего воздуха, %;

R_{vp}^{δ} - сопротивление паропроницанию, мг/(м·ч·Па), ограждающей конструкции между плоскостью возможной конденсации и наружной поверхностью;

e_{ext} – среднее парциальное давление водяного пара наружного воздуха, Па, за годовой период;

z_0 – продолжительность периода влагонакопления, т.е. периода с отрицательными среднемесячными температурами, сут;

E_0 – парциальное давление водяного пара в плоскости возможной конденсации, определяемое при средней температуре наружного воздуха периода месяцев с отрицательными среднемесячными температурами, Па;

ρ_w – плотность материала увлажняемого слоя, кг/м³;

δ_w – толщина увлажняемого слоя, м;

Δw_{av} – предельно допустимое приращение расчётного массового отношения влаги в материале увлажняемого слоя за период влагонакопления z_0 , %;

E – парциальное давление водяного пара в плоскости возможной конденсации за годовой период эксплуатации, Па;

$$E = (E_1 \cdot z_1 + E_2 \cdot z_2 + E_3 \cdot z_3) / 12, \quad (1.16)$$

где E_1, E_2, E_3 – парциальные давления водяного пара в плоскости возможной конденсации зимнего, летнего и осенне-весеннего периода, Па;

z_1, z_2, z_3 – продолжительность соответствующих периодов, мес;

η – коэффициент, определяемый по формуле 1.17.

$$\eta = 0,0024 \cdot (E_0 - e_0^{ext}) \cdot z_0 / R_{vp}^e, \quad (1.17)$$

где e_0^{ext} – среднее парциальное давление водяного пара наружного воздуха периода месяцев с отрицательными среднемесячными температурами, Па.

Парциальные давления водяного пара E_1, E_2, E_3 можно определить согласно следующим зависимостям [30]

- для $t < 0$:

$$E = \exp \frac{18,7 \cdot t_i - 115,72}{233,77 + 0,881 \cdot t_i}; \quad (1.18)$$

- для $t > 0$:

$$E = \exp \frac{16,57 \cdot t_i - 115,72}{233,77 + 0,997 \cdot t_i}, \quad (1.19)$$

где t_i – температура в плоскости возможной конденсации соответствующего периода, $^{\circ}\text{C}$.

Температура в плоскости возможной конденсации τ_c определяется согласно [30] по формуле

$$\tau_c = t_{\text{int}} - (t_{\text{int}} - t_{\text{ext}}) \cdot R_e / R_0, \quad (1.20)$$

где R_e – сопротивление теплопередаче конструкции до плоскости возможной конденсации, $\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$;

R_0 – полное сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции, $\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$.

Определение соответствия сопротивления паропроницанию нормативным значениям происходит следующим образом:

1. По формуле 1.12 определяем значение сопротивления паропроницанию ограждающей конструкции до плоскости возможной конденсации
2. Определяем R_{vp1}^{req} и R_{vp2}^{req}
3. Сравниваем R_{vp}^{des} с R_{vp1}^{req} и R_{vp2}^{req} . Должно выполняться следующее условие

$$R_{vp}^{\text{des}} \geq R_{vp1}^{req} (R_{vp2}^{req}). \quad (1.21)$$

Если условие 1.21 не выполняется, то, следовательно, в ограждающей конструкции будет накапливаться излишнее количество влаги, что говорит о непригодности теплоизоляционной конструкции.

Температурный перепад между температурой внутреннего воздуха и температурой внутренней поверхности ограждающей конструкции.

Расчётное значение температурного перепада Δt_0 , $^{\circ}\text{C}$ между температурой внутреннего воздуха в помещении и внутренней поверхности ограждающей конструкции определяется по формуле

$$\Delta t_0 = \frac{n \cdot (t_{int} - t_{ext})}{R_0 \cdot a_{int}}, \quad (1.22)$$

где n – коэффициент, учитывающий зависимость положения наружной поверхности ограждающей конструкции по отношению к наружному воздуху [100];

t_{int} – расчётная средняя температура внутреннего воздуха, $^{\circ}\text{C}$;

t_{ext} – расчётная температура наружного воздуха в холодный период года, $^{\circ}\text{C}$;

R_0 – приведенное сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции, $\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$;

a_{int} – коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающей конструкции, $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$ [100].

Полученное расчётное значение температурного перепада необходимо сравнить с нормируемым температурным перепадом, который определяется в зависимости от типа здания и вида ограждающей конструкции [100] Δt_n . Должно выполняться условие

$$\Delta t_0 \leq \Delta t_n. \quad (1.23)$$

Сопротивление воздухопроницанию R_{inf}^{des} многослойной ограждающей конструкции определяется как сумма сопротивлений воздухопроницанию отдельных слоёв ограждающих конструкций

$$R_{inf}^{des} = R_{inf1} + R_{inf2} + \dots + R_{infn}. \quad (1.24)$$

Нормируемое сопротивление воздухопроницанию определяется по формуле

$$R_{inf}^{req} = \Delta p / G_n, \quad (1.25)$$

где Δp – разность давлений воздуха на наружной и внутренней поверхности ограждающей конструкции, Па;

G_n - нормируемая воздухопроницаемость ограждающей конструкции кг/м²·ч [100];

При проведении сравнительного анализа энергосберегающих мероприятий с использованием теплоизоляционных материалов вышеперечисленные критерии должны соответствовать определённым условиям. Соответствие или несоответствие критериев оценки условиям эффективности и будет фактором выбора более эффективного энергосберегающего проекта.

Условия эффективности:

- $R_{p}^{des} \geq R_{p}^{req}$;
- $R_{vp}^{des} \geq R_{vp1}^{req}$ (R_{vp2}^{req});
- $\Delta t_0 \leq \Delta t_n$;
- $R_{inf}^{des} \geq R_{inf}^{req}$.

Вышеперечисленные условия позволяют определить соответствие параметров эффективности нормативным значениям и определить более эффективный теплоизоляционный материал из нескольких возможных.

1.2 «Точечное» утепление.

Неудовлетворительные параметры теплового комфорта, которые закладывались на стадии проектирования жилых зданий согласно санитарным нормам, а также несоответствие ограждающих конструкций проектированным теплотехническим параметрам привели к тому, что в настоящее время широко распространилась практика так называемого «точечного» утепления в многоквартирных домах (рис. 1.2) – монтаж наружного теплоизоляционного слоя в отдельно взятых квартирах. В условиях централизованного теплоснабжения без поквартирного регулирования тепловой нагрузки подобные мероприятия не является энергосберегающими, т.к. количество теплоты, поступающей в квартиру, не измениться и будет соответствовать температурному графику котельной.



Рисунок 1.2 – «Точечное» утепление

По своей сути, «точечное» утепления является частным случаем утепления ограждающих конструкций с непосредственным монтажом теплоизоляционного слоя на наружную поверхность ограждающей конструкции и имеет те же теплофизические основы.

Преимущества «точечного» утепления:

- возможность повышения температуры внутреннего воздуха в помещении;
- возможность проведения мероприятия независимо, непосредственно собственниками квартиры;
- широкий спектр возможных теплоизоляционных материалов.

Недостатки:

- при отсутствии поквартирного регулирования тепловой нагрузки не является энергосберегающим мероприятием;
- отсутствует методика, позволяющая определить эффективность такого мероприятия;
- негативное влияние на внешний вид здания;
- повышение влагонакопления в отдельных сегментах здания.

Как было сказано, «точечное» утепление не является энергосберегающим мероприятием и о его экономической эффективности речь не идет. Однако таким способом можно повысить температуру воздуха внутри квартиры путём снижения

потерь тепла через ограждающие конструкции. Именно температура воздуха в помещении после проведения утепления t_{int} и является критерием эффективности «точечного» утепления. При этом не проводиться никаких исследований и расчётов, с помощью которых можно было бы спрогнозировать потенциальное повышение температуры внутреннего воздуха в квартире после проведения теплоизоляционных работ. Задачей исследования является создание методики, с помощью которой возможно определить повышение температуры воздуха в помещении при различном расположении квартир в здании.

Для определения потенциального увеличения внутренней температуры в квартире необходимо первоначально определить существующую тепловую нагрузку отопления квартиры. Расчётная тепловая нагрузка отопления определяется по формуле [31,106]

$$Q_0 = Q_m + Q_u - Q_{mb}, \quad (1.26)$$

где Q_m – тепловые потери через ограждающие конструкции, Вт;

Q_u - тепловые потери инфильтрацией из-за поступления холодного воздуха через неплотности наружных ограждений, Вт;

Q_{mb} – внутренние тепловыделения, Вт;

Анализируя выражение 1.26 следует отметить, что наиболее значимой составляющей является Q_t – теплопотери через ограждающие конструкции. Тепловые потери через ограждающие конструкции определяются по формуле [31,106]

$$Q_m = (t_{int} - t_{ext}) \cdot \sum \left(\frac{A_n}{R_n} \right) \cdot \psi, \quad (1.27)$$

где t_{int} – температура внутреннего воздуха, °C;

t_{ext} – температура наружного воздуха, °C;

A_n – площадь отдельной ограждающей конструкции, м²;

R_n – сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции, м²·C/Bт;

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

В выражении 1.27 значение t_{int} при проектировании тепловой нагрузки отопления является постоянной величиной и определяется в значениях 18-20 °C согласно санитарным нормам и правилам. При расчёте прогнозируемого повышения внутренней температуры воздуха в квартире необходимо учитывать реальную существующую внутреннюю температуру t_{int}^ϕ , которая может не соответствовать проектируемому значению. В качестве наружной температуры воздуха t_{ext} при расчёте тепловой нагрузки будет использоваться средняя температура наружного воздуха в течении отопительного периода. При расчёте максимальной тепловой нагрузки применяется температура наиболее холодной пятидневки января. Таким образом, выражение для определения тепловых потерь через ограждающие конструкции принимает вид

$$Q^{cp} m = (t_{int}^\phi - t_{ext}^{cp}) \cdot \sum \left(\frac{A_n}{R_n} \right) \cdot \psi, \quad (1.28)$$

Выражение для определения тепловых потерь через ограждающие конструкции после проведения теплоизоляционных работ имеет вид

$$Q^{cp} m = (t_{int} - t_{ext}^{cp}) \cdot \sum \left(\frac{A_n}{R_n^m} \right) \cdot \psi, \quad (1.29)$$

где t_{int} – температура внутреннего воздуха после проведения теплоизоляционных работ, °C.

Тепловые потери с инфильтрацией Q_u определяются либо опытным путём, либо согласно выражению [31,106]

$$Q_u = \mu \cdot Q_m, \quad (1.30)$$

где μ – коэффициент инфильтрации.

Согласно [31], коэффициент инфильтрации определяется по формуле

$$\mu = 10^{-2} \cdot \sqrt{\left(2 \cdot g \cdot l \cdot \left(1 - \frac{273+t_{h,p,o}}{273+t_{int}^p}\right) + w_p^2\right)}, \quad (1.31)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с²;

l – свободная высота здания, м;

w_p^2 – расчётная для данной местности скорость ветра в отопительный период, м/с [99].

Внутренние тепловыделения Q_{m6} , как правило, не учитываются при расчёте тепловых нагрузок отопления, т.к. температура внутреннего воздуха в квартире должна оставаться на уровне нормативных значений независимо от наличия или отсутствия людей в квартире.

Таким образом, выражение для определения теплового баланса в помещении после теплоизоляционных работ имеет вид

$$\begin{aligned} (t_{int}^p - t_{ext}^{cp}) \cdot \sum \left(\frac{A_n}{R_n} \right) \cdot \psi \cdot \left(1 + 10^{-2} \cdot \sqrt{\left(2 \cdot g \cdot l \cdot \left(1 - \frac{273+t_{h,p,o}}{273+t_{int}^p} \right) + w_p^2 \right)} \right) = & (t_{int}^p - t_{ext}^{cp}) \cdot \sum \left(\frac{A_n}{R_n + \frac{\delta_m}{\lambda_m}} \right) \cdot \psi \times \\ & \times \left(1 + 10^{-2} \cdot \sqrt{\left(2 \cdot g \cdot l \cdot \left(1 - \frac{273+t_{h,p,o}}{273+t_{int}^p} \right) + w_p^2 \right)} \right), \end{aligned} \quad (1.32)$$

Анализ данных, полученный с помощью расчёта потерь с инфильтрацией согласно выражению 1.31, показал, что при незначительном ($\pm 5-8^\circ\text{C}$) изменении внутренней температуры воздуха в помещении t_{int}^p и неизменных других параметрах ($l, w_p, t_{h,p}$) значение коэффициента инфильтрации μ практически не меняется. Таким образом, для удобства расчёта повышения температуры воздуха в квартире, составляющую инфильтрации в обоих частях равенства можно считать постоянной. После математических преобразований, выражение 1.32 принимает вид

$$(t_{int}^{p_{int}} - t_{ext}^{cp_{ext}}) \cdot \sum \left(\frac{A_n}{R_n} \right) \cdot \psi = (t_{int} - t_{ext}^{cp_{ext}}) \cdot \sum \left(\frac{A_n}{R_n + \frac{\delta_m}{\lambda_m}} \right) \cdot \psi, \quad (1.33)$$

В выражении 1.33 величина t_{int} (повышение температуры воздуха в помещении после проведения «точечного» утепления) является критерием эффективности этого способа утепления.

1.3 Утепление с использованием навесного фасада с вентилируемой воздушной прослойкой

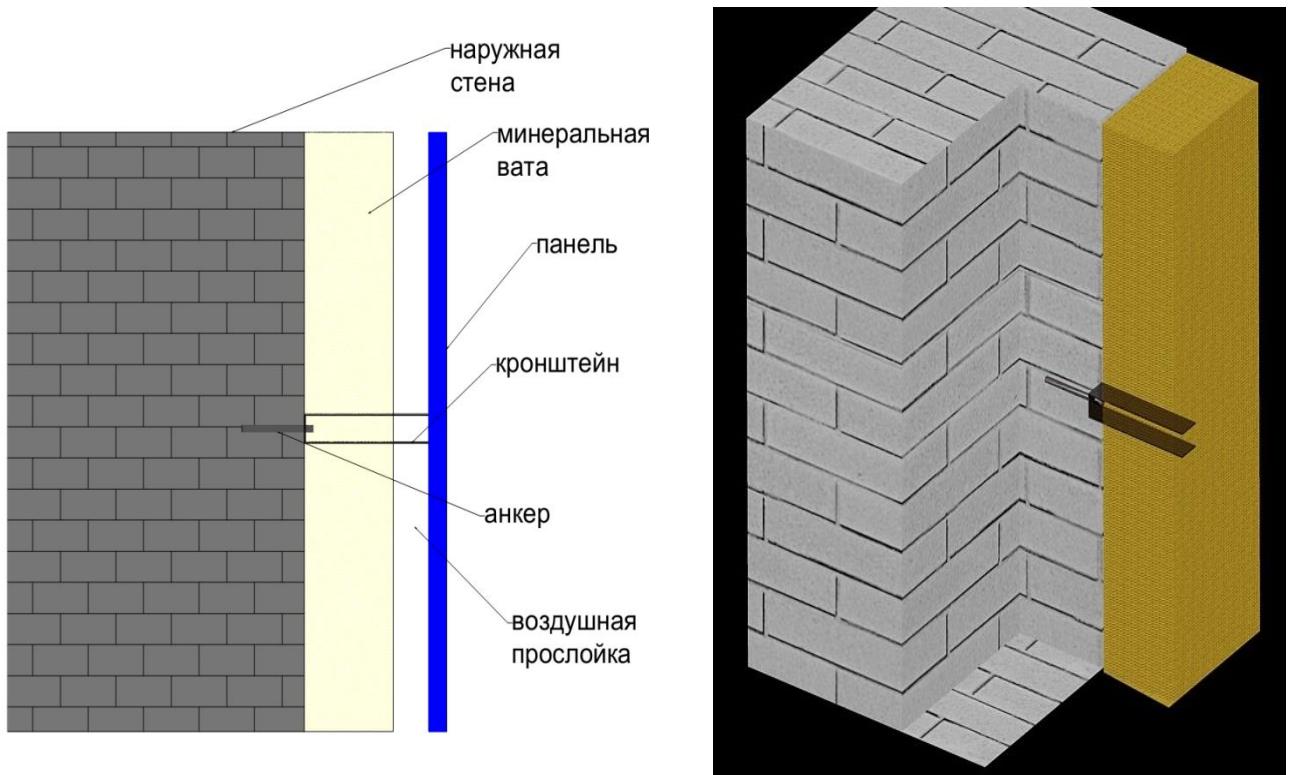


Рисунок 1.3 – Навесной вентилируемый фасад

Считается, что навесной фасад с вентилируемой воздушной прослойкой (рис. 1.3) является одним из самых эффективных современных способов утепления наружных стен зданий. Особенностью такой системы является наличие тонкой воздушной прослойки между теплоизоляционным и декоративным слоем конструкции (фасадная панель). Главная задача воздушной прослойки – улучшение теплотехнических характеристик всей конструкции, в частности,

удаление излишков влаги, которая может накапливаться в конструкции после монтажа дополнительного теплоизоляционного слоя и увеличение сопротивления теплопередаче конструкции. Монтаж навесного вентилируемого фасада возможен как на стадии постройки нового здания, так и при реконструкции уже существующего. Использование навесного облицовочного слоя при этом предоставляет широкий спектр возможностей для улучшения внешнего вида здания.

В качестве теплоизоляционного материала в системах навесных вентилируемых фасадов, как правило, используют минеральную вату. Толщина теплоизоляционного слоя и воздушной прослойки определяется необходимым сопротивлением теплопередаче и паропроницанию ограждающей конструкции, параметрами влагопереноса, а также характеристиками выбранного для монтажа типа конструкции вентилируемого фасада [43,78,89,90]:.

Тип и характеристика облицовочного слоя определяются прочностными расчетами для существующей ограждающей конструкции.

Навесные фасады с вентилируемой воздушной прослойкой имеют ряд особенностей, которые оказывают существенное влияние на теплотехнический расчет конструкции, а именно:

- наличие большого количества крепежных элементов (кронштейны, металлические профили, анкерные болты, дюбели и др.), которые оказывают влияние на однородность конструкции;
- воздух в воздушной прослойке имеет свои характеристики (температура, скорость движения), которые оказывают влияние на теплотехнические характеристики конструкции в целом.

Вышеперечисленные особенности усложняют определение экономической и теплотехнической эффективности использования навесного вентилируемого фасада, а именно сопротивления теплопередаче и влагопереносу конструкции

Повышенный интерес в современном строительстве и энергосбережении к вентилируемым навесным фасадам обусловлен теми возможностями, которые

такая система может обеспечить по сравнению с другими методами утепления наружных стен зданий, а именно:

- возможность снизить влагонакопление в конструкции;
- устранить излишний нагрев конструкции солнечным излучением;
- защита от атмосферной влаги.

При этом, основная цель применения навесного вентилируемого фасада – повышение теплозащитных характеристик ограждающей конструкции и приведении её в соответствие с существующими стандартами.

В связи с указанными выше особенностями применения навесных вентилируемых фасадов, необходимо отдельно рассмотреть каждый аспект этой технологии для конкретного объекта.

Сопротивление теплопередаче конструкции с навесным вентилируемым фасадом определяется по формуле [33,43,78,89,90]

$$R_{\text{нф}} = \frac{1}{a_{\text{int}}} + (R_{cm} + R_{ym}) \cdot r + R_{np} + R_o + \frac{1}{a_{\text{ext}}}, \quad (1.34)$$

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

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

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

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

r - коэффициент теплотехнической однородности, обусловленный наличием теплопроводных включений.

Преимущества вентилируемых фасадов:

- высокие теплозащитные характеристики;
- возможность удаления влаги из конструкции;
- широкий спектр возможностей для декоративной отделки здания.

Недостатки:

- сложность монтажа конструкции, связанная с использованием большого количества крепежных элементов;
- высокая стоимость конструкции;
- ограниченность в выборе теплоизоляционного материала;
- отсутствие методики для проверки расположения плоскости возможной конденсации в конструкции.

Наиболее существенными недостатками систем навесных вентилируемых фасадов является большое количество крепежных элементов, которые являются теплопроводными включениями, и отсутствие методики для определения плоскости возможной конденсации влаги и влагонакопления в конструкции.

Для ограждающих конструкций с вентилируемыми навесными фасадами определяющими теплопроводными включениями являются кронштейны и анкерные болты [33]. С помощью кронштейна несущий каркас соединяется с основанием, сам же кронштейн крепится к стене здания с помощью анкерного болта. Очевидно, что уменьшение коэффициента теплотехнической однородности негативно скажется не только на теплотехнической эффективности конструкции, но и снизит экономический эффект от реконструкции. Существующие методики расчета навесных вентилируемых фасадов [89,90] не предусматривают учета влияния крепежных элементов на теплотехническую однородность конструкции. Также методики [89,90] не предусматривают оценки экономической эффективности применения навесных вентилируемых фасадов.

Как было сказано, минеральная вата очень чувствительна к увлажнению. Согласно методическим рекомендациям по проектированию навесных вентилируемых фасадов [89, 90], плоскость возможной конденсации влаги в ограждающих конструкциях с вентилируемой прослойкой располагается либо на внешней границе теплоизоляционного слоя, либо на внутренней поверхности декоративного слоя, т.е. в самой воздушной прослойке. При этом не предусматривается расчет возможного расположения плоскости конденсации и не учитывается материал существующей ограждающей конструкции. Например, трехслойные железобетонные панели имеют свой внутренний

теплоизоляционный слой и конденсация влаги возможно внутри самой ограждающей конструкции на границах теплоизоляционного слоя. После же монтажа дополнительного утеплителя плоскость возможной конденсации может либо сместиться, либо расшириться. Исследовать влажностный режим в ограждающей конструкции и поведение плоскость возможной конденсации влаги возможно с помощью графоаналитического метода Фокина-Власова [73]. Суть этого метода состоит в графическом определении зон возможной конденсации влаги для периода влагонакопления и периода испарения влаги с дальнейшим графическим сопоставлением, после чего можно судить о влажностном режиме конструкции.

1.4 Критерии оценки экономической эффективности мероприятий по утеплению ограждающих конструкций зданий.

Экономические критерии оценки эффективности энергосберегающих мероприятий в большинстве случаев являются предопределяющими при выборе проекта. Максимизация экономического эффекта на фоне минимизации затрат - главная цель инвестиционного проекта. Часто именно минимальная стоимость проекта является ведущим фактором, определяющим решение в пользу того или иного теплоизоляционного материала (пренебрегая при этом теплотехническими и физическими параметрами).

Согласно методическим рекомендациям по оценке эффективности инвестиционных проектов и отбору для финансирования [72] сравнение различных инвестиционных проектов и выбор лучшего из них рекомендуется производить с использованием различных показателей, к которым относятся : чистый дисконтированный доход (*ЧДД*) или интегральный эффект, индекс доходности (*ИД*), внутренняя норма доходности (*ВНД*) и срок окупаемости Ток. Таким образом, с помощью этих критериев можно определить эффективность энергосберегающего проекта с экономической точки зрения.

- чистый дисконтированный доход

Чистый дисконтированный доход определяется как сумма текущих эффектов за весь расчётный период, приведенная к начальному шагу, или как превышение интегральных результатов над интегральными затратами [72].

В случае отсутствия инфляционных изменений на протяжении расчётного периода, ЧДД определяется по формуле

$$\text{ЧДД} = \sum_{t=0}^T (R_t - Z_t) \times \frac{1}{(1+E)^t}, \quad (1.35)$$

где R_t - результаты на t -ом шаге расчёта, руб;

Z_t - затраты на том же шаге (без учёта капитальных вложений), руб;

t – номер шага расчёта;

T_{cl} – предполагаемый срок эксплуатации объекта, лет;

E – норма дисконта, год⁻¹.

Для определения ЧДД используют также модифицированную формулу, в которой из состава затрат исключают капитальные вложения K

$$K = \sum_{t=0}^T K_t \times \frac{1}{(1+E)^t}, \quad (1.36)$$

где K_t – капитальные вложения на t -ом шаге, р.

Как правило, капитальные вложения в энергосберегающие проекты, связанные с теплоизоляционными материалами, носят единовременный характер. При этом текущие затраты могут возрастать в связи с инфляционным ростом цен.

Инфляция – снижение покупательной способности денежных средств, в результате чего прогнозируемые масштабы затрат и доходов по годам расчётного периода растут в соответствии с принятыми темпами инфляции [72].

При проведении экономических расчётов с учётом инфляции различают номинальную ставку дисконта E_n (включающую инфляцию) и реальную ставку дисконта (очищенную от инфляции).

Взаимосвязь между этими величинами следующая:

- при темпе инфляции от 3 до 5 %

$$E_p = E_n - a; \quad (1.37)$$

- при темпе инфляции выше 5 %:

$$E_p = \frac{E_n - a}{1 + a}, \quad (1.38)$$

где а – темп инфляционного роста, год $^{-1}$.

Таким образом, формула для определения ЧДД принимает вид

$$\text{ЧДД} = (R_0 - Z_0) \times \sum_{t=0}^T \left(\frac{1}{(1+E)^t} \right) - K. \quad (1.39)$$

Критерием финансовой эффективности инвестиционного проекта является выполнение следующего условия

$$\text{ЧДД} > 0. \quad (1.40)$$

С ростом ЧДД возрастает экономическая привлекательность проекта.

- *индекс доходности*

В соответствии с [72], из-за естественных ограничений, связанных с масштабом деятельности, большее значение ЧДД не всегда будет соответствовать более эффективному варианту капиталовложений. Поэтому для оценки эффективности финансовых проектов использую индекс доходности.

Индекс доходности (*ИД*) – отношение чистого дисконтированного дохода к величине капиталовложений. При единовременных капитальных затратах выражение для определения индекса доходности имеет вид

$$\text{ИД} = (R_0 - Z_0) \times \sum_{t=0}^T \frac{1}{(1+E)^t} / K. \quad (1.41)$$

По аналогии с ЧДД, чем выше ИД, тем выше эффективность инвестиционного проекта. Таким образом, условие экономической целесообразности имеет вид

$$ИД > 1. \quad (1.42)$$

Если два и более инвестиционных проекта имеют одинаковый ЧДД, то более эффективным будет проект с максимальным ИД.

- *дисконтированный срок окупаемости*

Срок окупаемости – это период, в течение которого, полностью возмещаются дисконтированные капитальные вложения за счёт чистого дохода [72].

Срок окупаемости считается показателем ликвидности, показывая срок, в течение которого средства будут заморожены в проекте. Чем короче срок окупаемости, тем выше значение годового чистого потока денежных средств.

Критерием эффективности инвестиционных проектов является выполнения условия

$$T_{ок} \rightarrow \min. \quad (1.43)$$

Срок окупаемости может быть определён графически или аналитически путём решения следующего уравнения

$$\sum_{t=0}^{T_{ок}} (R_t - Z_t) \times \frac{1}{(1 + E)^t} = \sum_{t=0}^{T_{ок}} K_t \times \frac{1}{(1 + E)^t}. \quad (1.44)$$

В случае единовременных капиталовложений и с учётом инфляции выражение 1.44 принимает вид

$$(R_0 - Z_0) \times \sum_{t=0}^{T_{ok}} \frac{1}{(1 + E_{bh})^t} = K. \quad (1.45)$$

Применяя аналитический метод определения срока окупаемости, путём математических преобразований получаем выражение для определения T_{ok} :

$$\sum_{t=0}^{T_{ok}} \frac{1}{(1 + E_{bh})^t} = \frac{K}{R_0 - Z_0}. \quad (1.46)$$

Левая часть выражения 1.46 представляет собой геометрическую прогрессию. При этом сумма T_{ok} – членов геометрической прогрессии должна удовлетворять равенству 1.46.

После математических преобразований с учётом формулы суммы n -членов геометрической прогрессии, получаем следующее выражение

$$\frac{1 - \frac{1}{(1 + E_{bh})^{T_{ok}}}}{1 - \frac{1}{(1 + E_{bh})}} = \frac{K}{R_0 - Z_0}. \quad (1.47)$$

Путём дальнейших математических преобразований получаем формулу для аналитического определения срока окупаемости дисконтированных инвестиций

$$T_{ok} = \frac{\ln(1 - \frac{K}{(R_0 - Z_0)} \times (\frac{1}{(1 + E_{bh})}))}{\ln \frac{1}{(1 + E_{bh})}}. \quad (1.48)$$

1.5 Выводы по разделу

В разделе обоснована необходимость анализа эффективности теплоизоляционных материалов при проведении мероприятий по модернизации ограждающих конструкций зданий.

В разделе выделены три основных направления при термомодернизации ограждающих конструкций зданий:

- изоляция без воздушной прослойки (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.

Для тепловой изоляции с непосредственным монтажом теплоизоляционного слоя на наружную поверхность ограждающей конструкции выделены критерии оценки теплотехнической эффективности:

- сопротивление теплопередаче конструкции R_{p}^{des} , ($\text{м}^2 \cdot \text{°К}/\text{Вт}$);
- сопротивление паропроницанию R_{vp}^{des} , $\text{мГ}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})$;
- температурный перепад Δt_0 , $^{\circ}\text{C}$;
- сопротивление воздухопроницанию R_{inf}^{des} , $\text{мГ}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})$.

Рассмотрены преимущества и недостатки такого способа утепления ограждающих конструкций.

Для «точечного» утепления было предложено использовать в качестве критерия эффективности температуру внутреннего воздуха t_{int} после монтажа теплоизоляционного слоя, которое получено из выражения для определения тепловой нагрузки. Рассмотрены преимущества и недостатки данного метода.

В разделе выделены основные проблемы навесных фасадов с вентилируемой воздушной прослойкой и обоснована необходимость их решения:

- необходимость учета влияния крепежных элементов на теплотехническую однородность конструкции и, соответственно, на теплотехническую и экономическую эффективность фасадов;
- необходимость определения плоскости возможной конденсации и параметров влагопередачи в конструкциях с навесными вентилируемыми фасадами.

В разделе были предложены следующие экономические критерии эффективности использования теплоизоляционных материалов при проведении модернизации ограждающих конструкций:

- чистый дисконтированный доход ЧДД;
- индекс доходности ИД;
- срок окупаемости $T_{ок}$.

Выражения для определения экономических критериев эффективности были преобразованы для мероприятий по усовершенствованию тепловой изоляции ограждающих конструкций.

1.6 Задачи исследования

Анализируя информацию, рассмотренную в пунктах 1.1 – 1.4, можно выделить следующие задачи исследования:

- с использованием критериев теплотехнической и экономической эффективности проанализировать эффективность наиболее распространенных теплоизоляционных материалов на примере зданий типовых серий 1-464 и 1-447 при непосредственном монтаже теплоизоляционного слоя на наружную поверхность ограждающей конструкции;
- определить степень влияния основных технических характеристик теплоизоляционного материала на энергетическую эффективность мероприятий по термомодернизации ограждающих конструкций;
- разработать методику определения параметров эффективности «точечного утепления», определить эффективность этого метода на примере жилых зданий типовых серий;
- обосновать методику определения сопротивления теплопередаче конструкций с навесным вентилируемым фасадом с учетом наличия воздушной прослойки;
- разработать модель участка конструкции с теплопроводным включением и определить степень влияния крепежных элементов на теплотехническую однородность ограждающих конструкций с навесным вентилируемым фасадом;

- разработать методику определения параметров паропроницания и влагопередачи в конструкциях с навесным вентилируемым фасадом с учетом наличия воздушной прослойки и определить влияние этих процессов на энергетическую эффективность технологии;
- разработать методику, позволяющую оценить параметры теплового комфорта в помещении до и после проведения теплоизоляционных работ;
- определить влияние крепежных элементов навесных вентилируемых фасадов на экономическую эффективность технологии на примере зданий типовых серий 1-464 и 1-447.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УТЕПЛЕНИЯ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ НЕПОСРЕДСТВЕННОМ МОНТАЖЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА НАРУЖНУЮ ПОВЕРХНОСТЬ

2.1 Целевой объект

Целевым объектом энергосберегающего мероприятия является жилое здание типовой серии 1-464 и 1-447 с известными параметрами (площадь ограждающих конструкций, высота, отапливаемый объём и тп.). Конструкционные особенности здания позволяют использовать несколько типов теплоизоляционных материалов заводского производства с установленными теплотехническими и физическими характеристиками. Из предложенных теплоизоляционных материалов необходимо выбрать тот, использование которого принесет наибольший экономический эффект, не нарушая при этом установленных норм и стандартов. При этом известны следующие параметры теплоизоляционных материалов:

1. Удельная стоимость 1 м³ материала и удельная стоимость монтажа 1 м² теплоизоляционного материала (с учётом декоративного слоя);
2. Теплопроводность материала λ , Вт/м·°C;
3. Плотность материала ρ , кг/м³;
4. Коэффициент паропроницания, мг/(м·ч·Па);
5. Сопротивление воздухопроницанию, кг/(м·ч·Па);
6. Срок эксплуатации теплоизоляционного материала, лет

Алгоритм для определения наиболее эффективного теплоизоляционного материала следующий:

1. Определить климатические параметры и продолжительность отопительного периода;

2. Определить нормативное значение сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции;
3. Определить сопротивление теплопередаче существующей ограждающей конструкции;
4. Определить значение полного сопротивления теплопередаче конструкции, сопротивления теплопередаче части конструкции до плоскости возможной конденсации и части конструкции между плоскостью возможной конденсации и наружной поверхности после реконструкции;
5. Сопоставить расчётные и нормативные значения сопротивления теплопередаче;
6. Определить параметры окружающей среды для расчёта сопротивления паропроницанию;
7. Определить фактические и нормативные значения сопротивления паропроницанию конструкции и сопоставить их;
8. Определить нормативные и фактические значения температурного перепада между внутренней поверхностью и внутренним воздухом и сопротивления воздухопроницанию. Сопоставить полученные значения;

Соответствие теплотехнических и санитарно-гигиенических критериев нормативным значениям определяет допустимость использования того или иного материала для реконструкции. Расчёт необходимо провести для каждого теплоизоляционного материала. Полученные результаты необходимо сопоставить между собой.

2.2 Формирование входных и выходных данных для анализа эффективности тепловой изоляции ограждающих конструкций

Для экспериментального расчёта параметров эффективности теплоизоляционных материалов в качестве целевого объекта выбрано 5-ти этажное панельное жилое здание типовой серии I-464. Ограждающие конструкции этого здания представляют собой трёхслойные железобетонные

панели (рис. 2.1; рис. 2.2), состоящие из следующих слоёв: внутренний облицовочный слой, две железобетонные плиты, промежуточные внутренний теплоизоляционный слой (минераловатные вкладыши). Площадь наружной поверхности ограждающих конструкций под тепловую изоляцию A_{cm} составляет 2468,97 м², высота здания – 13,5 м, высота здания от уровня пола первого этажа по верха вытяжной шахты – 15 м.

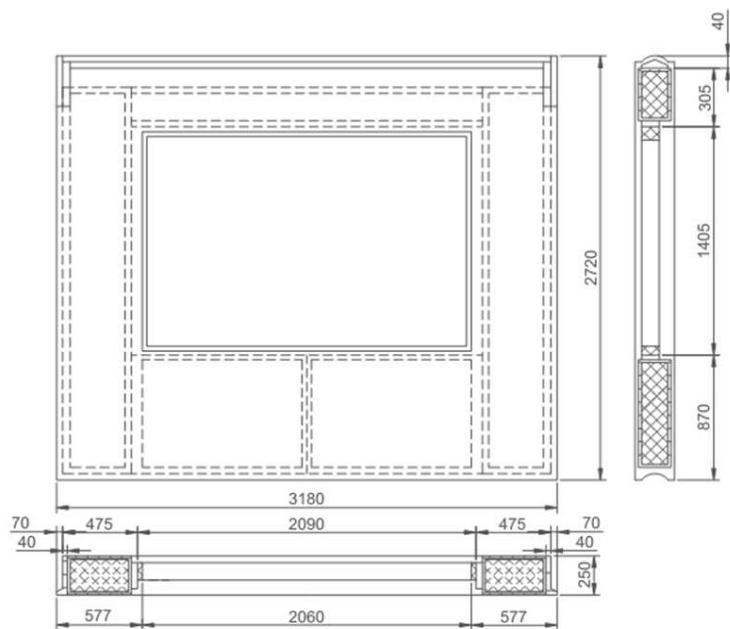


Рисунок 2.1 – Панель жилого здания типовой серии I-464

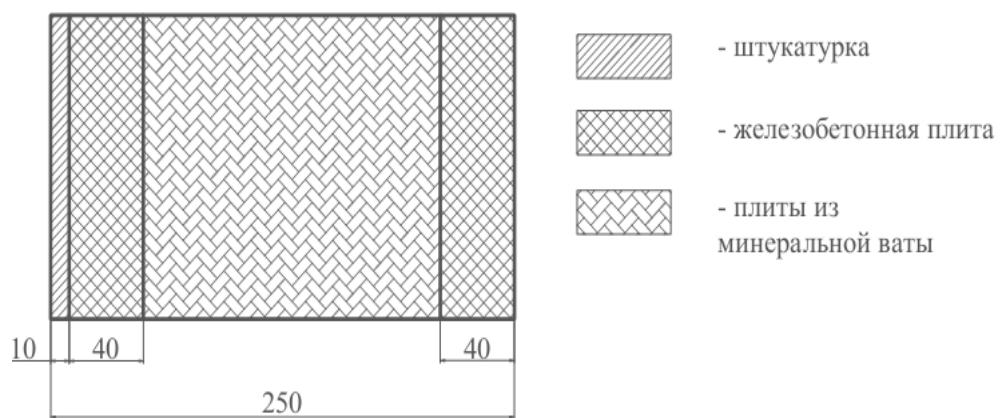


Рисунок 2.2 -Структура трёхслойной железобетонной панели

Следует отметить, что конструкция имеет внутренний теплоизоляционный слой. Следовательно, плоскость возможной конденсации находится между теплоизоляционным слоем и наружной железобетонной панелью.

В качестве возможных теплоизоляционных материалов для реконструкции выбраны следующие:

- плиты минераловатные на битумном связующем со следующими параметрами: $\lambda_m = 0,056 \text{ Вт}/\text{м}\cdot\text{К}$; $\delta_m = 0,1 \text{ м}$; $\rho = 200 \text{ кг}/\text{м}^3$; $\mu_m = 0,49 \text{ мГ}/\text{м}\cdot\text{ч}\cdot\text{Па}$; $c_{m,\omega} = 900 \text{ руб}/\text{м}^3$; $c_m = 300 \text{ руб}/\text{м}^2$; $T_{cl} = 30 \text{ лет}$.

- пенополистирол ПБС-С со следующими параметрами: $\lambda_m = 0,038 \text{ Вт}/\text{м}\cdot\text{К}$; $\delta_m = 0,1 \text{ м}$; $\rho = 40 \text{ кг}/\text{м}^3$; $\mu_m = 0,03 \text{ мГ}/\text{м}\cdot\text{ч}\cdot\text{Па}$; $c_{m,\omega} = 1100 \text{ руб}/\text{м}^3$; $c_m = 250 \text{ руб}/\text{м}^2$; $T_{cl} = 30 \text{ лет}$.

- пенопласт марки ФФ-170 со следующими параметрами: $\lambda_m = 0,047 \text{ Вт}/\text{м}\cdot\text{К}$; $\delta_m = 0,1 \text{ м}$; $\rho = 170 \text{ кг}/\text{м}^3$; $\mu_m = 0,23 \text{ мГ}/\text{м}\cdot\text{ч}\cdot\text{Па}$; $c_{m,\omega} = 1000 \text{ руб}/\text{м}^3$; $c_m = 250 \text{ руб}/\text{м}^2$; $T_{cl} = 30 \text{ лет}$.

- пенополиуретан ППУ-331 со следующими параметрами: $\lambda_m = 0,029 \text{ Вт}/\text{м}\cdot\text{К}$; $\delta_m = 0,1 \text{ м}$; $\rho = 45 \text{ кг}/\text{м}^3$; $\mu_m = 0,05 \text{ мГ}/\text{м}\cdot\text{ч}\cdot\text{Па}$; $c_{m,\omega} = 2000 \text{ руб}/\text{м}^3$; $c_m = 150 \text{ руб}/\text{м}^2$; $T_{cl} = 50 \text{ лет}$.

Заявленный производителями срок службы некоторых теплоизоляционных материалов может составлять 50 и более лет. Однако при расчёте экономических параметров эффективности срок службы теплоизоляционного материала не может превышать срока эксплуатации самого здания. В рассматриваемом случае для панельного здания типовой серии I-464 1970-го года постройки срок эксплуатации продлён на 30 лет. Поэтому в этом случае, если заявленный срок службы теплоизоляционного материала превышает 30 лет, то при расчёте экономических параметров в качестве срока службы мы будем использовать срок эксплуатации здания, т.е. 30 лет.

Данные расчётов эффективности для вышеперечисленных теплоизоляционных материалов представлены в Приложении А.

Проведённый анализ вариантов применения теплоизоляционных материалов позволяет определить эффективность каждого возможного варианта реконструкции ограждающих конструкций зданий при известных параметрах теплоизоляционных материалов. В ходе расчёта были получены расчётные и

нормативные показатели сопротивления теплопередаче, паропроницания и воздухопроницания, температурный перепад. Эти показатели позволяют определить уровень допустимости того или иного теплоизоляционного материала для реконструкции. Расчёт экономических показателей позволяет определить наиболее эффективный материал с экономической точки зрения.

Такие расчёты позволяют проанализировать эффективность энергосберегающих мероприятий на стадии проектирования и позволяют выбрать наиболее привлекательный инвестиционный проект. С некоторыми дополнениями подобный расчёт можно проводить для зданий любых типов и назначений и при любых источниках финансирования инвестиционных проектов.

В рассматриваемом случае эффективным материалом для реконструкции жилого здания типовой серии 1-464 , учитывая значение индекса доходности и сложности монтажа, является пенополистирол. Утепление минеральной ватой имеет наихудшие экономические показатели (Приложение А).

2.3 Определение допустимых и эффективных значений толщины теплоизоляционного слоя δ_t

При проектировании энергосберегающих мероприятий, в особенности масштабных реконструкций жилых или административных зданий, производится анализ рынка теплоизоляционных материалов, работа с поставщиками или производителями материалов, подрядными организациями. Крупные поставщики или производители, как правило, способны предложить широкий ассортимент теплоизоляционных материалов различных теплотехнических характеристик. Однако существуют некоторые ограничения в применении тех или иных материалов. Например, пенопласти обладают высокой степенью горючести и, как правило, не применяются при утеплении высотных строений, при утеплении фасадов зданий применяют жесткие или полужесткие минераловатные плиты и т.п. Таким образом, ещё на начальной стадии проектирования энергосберегающих мероприятий можно приблизительно определить тип материала, который будет использоваться при реконструкции.

Поставщик или производитель предлагает материал с установленным набором теплотехнических свойств (δ , μ , λ , ρ). Однако, если такие свойства материала, как теплопроводность, плотность, паропроницание связаны с технологией изготовления и не регулируются, то толщина теплоизоляционного изделия может варьироваться. Таким образом, задача сводиться к нахождению эффективной толщины теплоизоляционного слоя при известных физических и теплотехнических параметрах материала (μ , λ , ρ).

2.3.1 Критерии выбора эффективной толщины теплоизоляционного материала

В разделе 1 были определены критерии оценки эффективности использования теплоизоляционных материалов. Эти же критерии будут использоваться для определения эффективной толщины теплоизоляционного слоя. С помощью теплотехнических и санитарно-гигиенических критериев мы получим диапазон изменения приемлемой для реконструкции толщины теплоизоляционного материала, а с помощью экономических критериев определим наиболее эффективную толщину на этом диапазоне.

Условие соответствия требуемому сопротивлению теплопередаче.

После преобразования выражений для определения параметров теплотехнической эффективности, рассмотренных в разделе 1 (пункт 1.1), получим выражения для определения оптимальной толщины теплоизоляционного слоя

$$\delta_m \geq \lambda_m \cdot (R_{req} - R_{deq} - R_c). \quad (2.1)$$

Выражение 2.1 является первым критерием для определения приемлемой толщины теплоизоляционного материала. Следует отметить, что данный критерий имеет смысл том случае, если сопротивление теплопередаче существующей ограждающей конструкции меньше нормативного значения, т.к. в противном случае условие 2.1 будет выполняться при любых δ_t .

Из условия соответствия нормативному значению перепада температур

$$\delta_m \geq \lambda_m \cdot \left(\frac{n \cdot (t_{int} - t_{ext})}{\Delta t_n \cdot a_{int}} - R_c - R_{dek} \right). \quad (2.2)$$

Выражение 2.2 является санитарно-гигиеническим критерием определения эффективной толщины теплоизоляционного слоя.

Условие соответствия сопротивления паропроницанию.

Для расчёта параметров сопротивления паропроницанию необходимо найти сопротивление паропроницанию конструкции в пределах от внутренней поверхности до плоскости возможной конденсации. Существует два варианта расположения плоскости возможной конденсации:

- ограждающая конструкция не имеет внутреннего теплоизоляционного слоя (кирпичная кладка, однослочная панель и др.);

В этом случае плоскость возможной конденсации располагается на расстоянии 2/3 общей толщины конструкции от внутренней поверхности. С учётом наличия в конструкции внутреннего облицовочного слоя

$$\delta_{yb} = \frac{2}{3} \cdot (\delta_1 + \delta_2), \quad (2.3)$$

где δ_{yb} – толщина конструкции до плоскости возможной конденсации (увлажняемый слой), м;

δ_1 – толщина внутреннего облицовочного слоя, м;

δ_2 – толщина основного слоя конструкции, м.

Обозначим увлажняемую часть основного слоя δ_2' . Его толщина равна

$$\delta_2' = \frac{2}{3} \cdot (\delta_1 + \delta_2) - \delta_1 = \frac{1}{3} \cdot (2 \cdot \delta_2 - \delta_1). \quad (2.4)$$

Таким образом, сопротивление паропроницанию ограждающей конструкции до плоскости возможной конденсации равно

$$R_{vp}^{des} = \frac{\delta_1}{\mu_1} + \frac{\frac{1}{3} \cdot (2 \cdot \delta_2 - \delta_1)}{\mu_2}. \quad (2.5)$$

Обозначим толщину основного слоя конструкции между плоскостью возможной конденсации и наружной поверхностью как δ_2'' . Его толщина равна

$$\delta_2'' = \delta_2 - \frac{1}{3} \cdot (2 \cdot \delta_2 - \delta_1) = \frac{1}{3} \cdot (\delta_2 + \delta_1). \quad (2.6)$$

С учётом 2.6 получим выражение для определения сопротивления паропроницанию слоя ограждающей конструкции между плоскостью возможной конденсации и наружной поверхностью после реконструкции

$$R_{vp}^e = \frac{\frac{1}{3} \cdot (\delta_2 + \delta_1)}{\mu_2} + \frac{\delta_m}{\mu_m} + \frac{\delta_{de}}{\mu_{de}}. \quad (2.7)$$

С учётом 2.7

$$R_{vp1}^{req} = \frac{(e_{int} - E) \cdot \left(\frac{\frac{1}{3} \cdot (\delta_2 + \delta_1)}{\mu_2} + \frac{\delta_m}{\mu_m} + \frac{\delta_{de}}{\mu_{de}} \right)}{(E - e_{ext})}. \quad (2.8)$$

Температура в плоскости возможной конденсации, с учётом преобразований в пункте 2.4, определяется выражением

$$\tau_c = t_{int} - \frac{(t_{int} - t_i) \cdot R_e}{R_{de} + R_c + \frac{\delta_m}{\lambda_m}}. \quad (2.9)$$

Выражение для определения парциального давления водяного пара принимает вид

$$E_i = \exp \frac{16,57 \cdot (t_{\text{int}} - \frac{(t_{\text{int}} - t_i) \cdot R_s}{R_{\text{deek}} + R_c + \frac{\delta_m}{\lambda_m}}) - 115,72}{233,77 + 0,997 \cdot (t_{\text{int}} - \frac{(t_{\text{int}} - t_i) \cdot R_s}{R_{\text{deek}} + R_c + \frac{\delta_m}{\lambda_m}})}. \quad (2.10)$$

Таким образом, с учётом 2.10 выражение 1.16 принимает вид

$$E = \frac{1}{12} \cdot (z_1 \cdot \exp \frac{16,57 \cdot (t_{\text{int}} - \frac{(t_{\text{int}} - t_1) \cdot R_s}{R_{\text{deek}} + R_c + \frac{\delta_m}{\lambda_m}}) - 115,72}{233,77 + 0,997 \cdot (t_{\text{int}} - \frac{(t_{\text{int}} - t_1) \cdot R_s}{R_{\text{deek}} + R_c + \frac{\delta_m}{\lambda_m}})} + z_2 \cdot \exp \frac{16,57 \cdot (t_{\text{int}} - \frac{(t_{\text{int}} - t_2) \cdot R_s}{R_{\text{deek}} + R_c + \frac{\delta_m}{\lambda_m}}) - 115,72}{233,77 + 0,997 \cdot (t_{\text{int}} - \frac{(t_{\text{int}} - t_2) \cdot R_s}{R_{\text{deek}} + R_c + \frac{\delta_m}{\lambda_m}})} + z_3 \cdot \exp \frac{16,57 \cdot (t_{\text{int}} - \frac{(t_{\text{int}} - t_3) \cdot R_s}{R_{\text{deek}} + R_c + \frac{\delta_m}{\lambda_m}}) - 115,72}{233,77 + 0,997 \cdot (t_{\text{int}} - \frac{(t_{\text{int}} - t_3) \cdot R_s}{R_{\text{deek}} + R_c + \frac{\delta_m}{\lambda_m}})}) \quad (2.11)$$

где t_1, t_2, t_3 – средние температуры наружного воздуха летнего, зимнего и осенне-весеннего периодов, $^{\circ}\text{C}$

Нормируемое сопротивление паропроницанию из условия ограничения накопления влаги за период с отрицательными среднемесячными температурами определяется, с учётом 2.6, 2.8 и 2.9 принимает вид

$$R_{vp2}^{req} = \frac{0,0024 \cdot z_0 \cdot (e_{\text{int}} - \exp \frac{16,57 \cdot (t_{\text{int}} - \frac{(t_{\text{int}} - t_{cp}^0) \cdot R_s}{R_{\text{deek}} + R_c + \frac{\delta_m}{\lambda_m}}) - 115,72}{233,77 + 0,997 \cdot (t_{\text{int}} - \frac{(t_{\text{int}} - t_{cp}^0) \cdot R_s}{R_{\text{deek}} + R_c + \frac{\delta_m}{\lambda_m}})})}{16,57 \cdot (t_{\text{int}} - \frac{(t_{\text{int}} - t_{cp}^0) \cdot R_s}{R_{\text{deek}} + R_c + \frac{\delta_m}{\lambda_m}}) - 115,72} \cdot \rho_w \cdot \delta_w \cdot \Delta w_{aw} + 0,0024 \cdot (\exp \frac{1}{233,77 + 0,997 \cdot (t_{\text{int}} - \frac{(t_{\text{int}} - t_{cp}^0) \cdot R_s}{R_{\text{deek}} + R_c + \frac{\delta_m}{\lambda_m}})} - e_0^{ext}) \cdot z_0 / (\frac{1}{3} \cdot (\delta_2 + \delta_1) / \mu_2 + \frac{\delta_m}{\mu_m} + \frac{\delta_{deek}}{\mu_{deek}}) \quad (2.12)$$

где t_{cp}^0 – средняя температура периода с отрицательными среднемесячными температурами, °С

- ограждающая конструкция имеет внутренний теплоизоляционный слой (трёхслойная железобетонная панель и др.)

В этом случае плоскость возможной конденсации совпадает в наружной поверхностью внутреннего теплоизоляционного слоя. Таким образом, сопротивление паропроницанию части ограждающей конструкции от внутренней поверхности до плоскости возможной конденсации имеет вид

$$R_{vp}^{des} = \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\mu_i} = \frac{\delta_1}{\mu_1} + \frac{\delta_2}{\mu_2} + \dots + \frac{\delta_n}{\mu_n}, \quad (2.13)$$

где δ_n – толщина внутреннего теплоизоляционного слоя, м;

μ_n – коэффициент паропроницанию внутреннего теплоизоляционного слоя, мГ/м·ч·Па.

Сопротивления паропроницанию части конструкции от плоскости возможной конденсации до наружной поверхности определяется по формуле

$$R_{vp}^s = \frac{\delta_{n+1}}{\mu_{n+1}} + \frac{\delta_m}{\mu_m} + \frac{\delta_{dek}}{\mu_{dek}}. \quad (2.14)$$

С учётом 2.3 и 2.4 выражения для определения нормативных значений сопротивлений паропроницанию 2.8 и 2.12 принимают вид

$$R_{vp1}^{req} = (e_{int} - E \cdot (\frac{\delta_{n+1}}{\mu_{n+1}} + \frac{\delta_m}{\mu_m} + \frac{\delta_{dek}}{\mu_{dek}})) / (E - e_{ext}). \quad (2.15)$$

$$\begin{aligned}
R_{vp2}^{req} = & \frac{0,0024 \cdot z_0 \cdot (e_{int} - \exp \frac{16,57 \cdot (t_{int} - t_{cp}^0) \cdot R_s}{R_{dek} + R_c + \frac{\delta_m}{\lambda_m}})}{233,77 + 0,997 \cdot (t_{int} - \frac{(t_{int} - t_{cp}^0) \cdot R_s}{R_{dek} + R_c + \frac{\delta_m}{\lambda_m}})} \\
& \frac{16,57 \cdot (t_{int} - \frac{(t_{int} - t_{cp}^0) \cdot R_s}{R_{dek} + R_c + \frac{\delta_m}{\lambda_m}}) - 115,72}{233,77 + 0,997 \cdot (t_{int} - \frac{(t_{int} - t_{cp}^0) \cdot R_s}{R_{dek} + R_c + \frac{\delta_m}{\lambda_m}})} \\
& \rho_w \cdot \delta_w \cdot \Delta w_{aw} + 0,0024 \cdot (\exp \frac{16,57 \cdot (t_{int} - t_{cp}^0) \cdot R_s}{R_{dek} + R_c + \frac{\delta_m}{\lambda_m}} - 115,72) \\
& - e_0^{ext} \cdot z_0 / (\frac{\delta_{n+1}}{\mu_{n+1}} + \frac{\delta_m}{\mu_m} + \frac{\delta_{dek}}{\mu_{dek}})
\end{aligned} \tag{2.16}$$

2.3.2 Допустимая и эффективная толщина теплоизоляционного материала

Первым шагом при определении допустимой толщины теплоизоляционного слоя является решение неравенств 2.17 с учетом вышеуказанных выводов и подстановок

$$\begin{cases} \delta_m \geq \lambda_m \cdot (R_{req} - R_{dek} - R_c) \\ \delta_m \geq \lambda_m \cdot (\frac{n \cdot (t_{int} - t_{ext})}{\Delta t_n \cdot a_{int}} - R_c - R_{dek}) \\ R_{vp}^{des} \geq R_{vp1,2}^{req} \end{cases} \tag{2.17}$$

Полученные при этом данные должны быть интерпретированы. Минимальное значение диапазона δ_{min} не должно быть меньше 0, т.к. речь идёт о толщине материала. Максимальное значение толщины теплоизоляционного слоя δ_{max} не должно превышать максимально допустимую толщину теплоизоляционного слоя, которую возможно использовать при утеплении. Например, при утеплении фасадов зданий толщина теплоизоляционного слоя как правило, не превышает 20 см. Таким образом, полученный уточнённый диапазон допустимой толщины теплоизоляционного слоя должен укладываться в диапазон от 0 до 0,2 м.

2.3.3 Расчёт эффективной толщины теплоизоляционного слоя для заданной конструкции

Для расчёта эффективной толщины теплоизоляционного материала выбираем трёхэтажное жилое здание. Материал ограждающих конструкций – керамический кирпич. Толщина наружных стен – 0,3 м. Необходимые для расчёта характеристики (входные данные для расчёта) представлены в Приложении Б.

В качестве теплоизоляционного материала выбран экструдированный пенополистирол со следующими характеристиками:

$\lambda_m = 0,031 \text{ Вт}/\text{м}\cdot\text{К}$; $\mu_m = 0,03 \text{ мг}/\text{м}\cdot\text{ч}\cdot\text{Па}$; $c_{m.m.} = 1100 \text{ руб}/\text{м}^3$; $c_m = 250 \text{ руб}/\text{м}^2$; $T_{cl} = 30 \text{ лет}$.

Расчеты параметров эффективности представлены в Приложении Б

2.3.4 Предварительные ограничения искомого параметра – толщины теплоизоляционного слоя

При последовательном решении 2.17 можно получить неадекватные решения, т.е. отрицательные значения толщины теплоизоляционного слоя, либо наоборот – такие значения толщины теплоизоляционного слоя, которые превышают толщину самой ограждающей конструкции или максимальную толщину, заявленную производителем материала. Чтобы избежать получения неадекватных результатов и максимально упростить расчёт необходимо предварительно задать допустимый интервал изменения толщины теплоизоляционного слоя. С учётом толщины ограждающей конструкции текущего расчёта и возможной максимальной толщины слоя экструдированного пенополистирола, примем интервал изменения толщины теплоизоляционного слоя $\delta_t \in (0;0,2]$.

2.3.5 Определения допустимого интервала толщины теплоизоляционного слоя согласно теплотехническим и санитарно - гигиеническим критериям

Путём решения 2.9 и 2.12 получены следующие допустимые интервалы:

- из условия нормативного сопротивления теплопередаче:

$\delta_t \in [0,063;0,2], \text{м}$

- из условия нормативного температурного перепада:

$\delta_t \in [0,017;0,2], \text{м}$

Таким образом, итоговый интервал - $\delta_t \in [0,063; 0,2], \text{м.}$

- из условия соответствия нормативным параметрам паропроницания (период с отрицательными среднемесячными температурами):

Для определения соответствия определённого параметра построим график зависимости сопротивления паропроницанию от толщины теплоизоляционного слоя (рисунок 2.3).



Рисунок 2.3 - График зависимости функции сопротивления паропроницанию от толщины теплоизоляционного слоя δ_m

По графику видно, что на всём полученном интервале изменения толщины теплоизоляционного слоя не нарушаются требований по накоплению влаги в течении периода с отрицательными среднемесячными температурами, о чём говорит положительные значения функции $f(\delta_t)$.

Таким образом, был получен оптимальный диапазон толщины теплоизоляционного материала. В разделе 4 с помощью экономических критериев эффективности будет получено максимально эффективное значение толщины теплоизоляционного слоя.

2.4 Определения эффективности теплоизоляционных материалов при «точечном» утеплении

Как было сказано ранее, «точечное» утепление является частным случаем непосредственного монтажа теплоизоляционного материала на наружную поверхность ограждающих конструкций. В разделе 1 предложено использовать значение температуры внутреннего воздуха в помещении после монтажа теплоизоляционного слоя в качестве критерия эффективности. Однако в зависимости от расположения квартиры в здании, выражения для определения внутренней температуры воздуха будут отличаться.

2.4.1 Определение сопротивления теплопередаче

В зависимости от расположения квартиры, различают следующие ограждающие конструкции, через которые возможны тепловые потери:

- наружные стены;
- стены, выходящие в подъезд;
- потолочные перекрытия (для квартир верхнего этажа);
- перекрытия пола (для квартир первого этажа);
- светопрозрачные ограждающие конструкции.

Расчёт сопротивления теплопередаче для каждого типа конструкции имеет свои особенности:

- *наружные стены.*

Выражение для определения тепловых потерь через наружные стены имеет вид

$$R_n = \frac{1}{a_{int}} + \sum_{n=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{a_{ext}}, \quad (2.18)$$

где δ_n – толщина слоя n, м;

λ_n – коэффициент теплопроводности материала слоя n, Вт/(м· °C);

a_{int} – коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности конструкции, Вт/ (м²· °C), (для гладких стен и потолков равен 8,7 Вт/ (м²· °C));

a_{ext} – коэффициент теплоотдачи наружной поверхности ограждения; для зимних условий принимается равным 23 Вт/ (м²· °C).

Изначально при расчёте тепловой нагрузки отопления рассчитывается сопротивление теплопередаче до теплоизоляционных работ. При расчёте теплопотерь после утепления добавляются сопротивление теплопередаче теплоизоляционного слоя

$$R_h = \frac{1}{a_{int}} + \sum_{n=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{a_{ext}} + \frac{\delta_m}{\lambda_m}. \quad (2.19)$$

Тепловые потери через наружные стены определяются по формуле

$$Q_m = (t_{int} - t^{cp}_{ext}) \cdot \left(\frac{A_h}{R_h + \frac{\delta_m}{\lambda_m}} \right), \quad (2.20)$$

где A_h - площадь наружных стен, м^2 .

Следует отметить, что в случае «точечного» утепления в многоквартирных домах декоративный слой, как правило, представляет собой тонкий слой штукатурки, а в некоторых случаях, вообще отсутствует. Это связано с технической сложностью монтажа качественного декоративного слоя при проведении верхолазных работ и дешевизной утепления. Поэтому, при расчёте «точечного» утепления сопротивление теплопередаче декоративного слоя учитываться не будут.

- *перекрытия потолка*

Тепловые потери через потолочные перекрытия актуальны для квартир верхних этажей. В случае наличия неотапливаемых чердаков, выражение для расчёта сопротивления теплопередаче принимает вид

$$R_{nm} = \frac{2}{a_{int}} + \sum_{n=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}. \quad (2.21)$$

Выражение для определения тепловых потерь в этом случае принимает вид

$$Q_m = (t_{\text{int}} - t_{\text{int}}^{nm}) \cdot \frac{A_{nm}}{R_{nm}} \cdot \psi_{nm}, \quad (2.22)$$

где t_{int}^{nm} - внутренняя температура воздуха чердачного помещения, °C.

A_{nm} - площадь потолочных перекрытий, м².

- *перекрытия пола*

Тепловые потери через перекрытия пола актуальны для квартир первого этажа и определяются выражением

$$Q_m = (t_{\text{int}} - t_{\text{int}}^{nl}) \cdot \frac{A_{nl}}{R_{nl}} \cdot \psi_{nl}, \quad (2.23)$$

где t_{int}^{nl} - температура воздуха в подвале или подполье, °C.

A_{nl} - площадь полов квартиры, м².

- *стены подъезда*

Тепловые потери через стены, выходящие в подъезд, актуальны для многоквартирных домов, т.к. практически все квартиры частично граничат с пространством подъезда, а температура в подъезде, особенно в неотапливаемых, ниже температуры в квартире. Сопротивление теплопередаче в этом случае определяется следующим образом

$$Q_m = (t_{\text{int}} - t_{\text{int}}^{no\delta}) \cdot \frac{A_{no\delta}}{R_{no\delta}}, \quad (2.24)$$

где $t_{\text{int}}^{no\delta}$ - температура воздуха в подъезде, °C.

$A_{no\delta}$ - площадь подъездных стен, м².

- *светопрозрачные ограждающие конструкции*

Любая квартира имеет окна и значительная доля тепловых потерь квартиры приходится на потери через светопрозрачные конструкции. Старые окна, либо некачественно установленные современные стеклопакеты, оказывают существенный влияние на тепловой баланс помещения. Полное сопротивление

теплопередаче светопрозрачных ограждающих конструкций определяется по формуле

$$R_c = \frac{1}{a_{\text{int}}^{\text{ок}}} + R_0 + \frac{1}{a_{\text{ext}}}, \quad (2.25)$$

где $a_{\text{int}}^{\text{ок}}$ – коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности конструкции, Вт/(м²· °C), (для окон - 8 Вт/(м²· °C));

R_0 – приведенное сопротивление теплопередаче светопрозрачной конструкции м²· °C/Вт.

Тепловые потери через светопрозрачные конструкции определяются выражением

$$Q_m = (t_{\text{int}} - t_{\text{ext}}^{\text{cp}}) \cdot \frac{A_c}{R_c}, \quad (2.26)$$

где A_c – площадь светопрозрачных ограждающих конструкций, м².

2.4.2 Определение температуры внутреннего воздуха

С учетом пункта 2.4.1, выражение для определения общих тепловых потерь через ограждающие конструкции для каждого случая расположения квартиры имеет вид

- квартира верхнего этажа:

$$Q_m = (t_{\text{int}} - t_{\text{ext}}^{\text{cp}}) \cdot \left(\frac{A_h}{R_h} + \frac{A_c}{R_c} + \frac{A_{nm}}{R_{nm}} \cdot \psi_{nm} \right) + (t_{\text{int}} - t_{\text{int}}^{\text{no}\partial}) \cdot \frac{A_{no\partial}}{R_{no\partial}}; \quad (2.27)$$

- квартира первого этажа:

$$Q_m = (t_{\text{int}} - t_{\text{ext}}^{\text{cp}}) \cdot \left(\frac{A_h}{R_h} + \frac{A_c}{R_c} \right) + (t_{\text{int}} - t_{\text{int}}^{\text{no}\partial}) \cdot \frac{A_{no\partial}}{R_{no\partial}} + (t_{\text{int}} - t_{\text{int}}^{n.l}) \cdot \frac{A_{n.l}}{R_{n.l}} \cdot \psi_{n.l}; \quad (2.28)$$

- квартира общего расположения:

$$Q_m = (t_{\text{int}} - t^{\text{cp ext}}) \cdot \left(\frac{A_h}{R_h + \frac{\delta_m}{\lambda_m}} + \frac{A_c}{R_c} \right) + (t_{\text{int}} - t_{\text{int}}^{\text{nodo}}) \cdot \frac{A_{\text{nodo}}}{R_{\text{nodo}}}; \quad (2.29)$$

- квартира верхнего этажа с чердачным перекрытием:

$$Q_m = (t_{\text{int}} - t^{\text{cp ext}}) \cdot \left(\frac{A_h}{R_h + \frac{\delta_m}{\lambda_m}} + \frac{A_c}{R_c} \right) + (t_{\text{int}} - t_{\text{int}}^{\text{nodo}}) \cdot \frac{A_{\text{nodo}}}{R_{\text{nodo}}} + (t_{\text{int}} - t_{\text{int}}^{\text{nm}}) \cdot \frac{A_{\text{nm}}}{R_{\text{nm}}} \cdot \psi_{\text{nm}}. \quad (2.30)$$

Выражение для определения температуры внутреннего воздуха после проведения теплоизоляционных работ для каждого конкретного случая расположения квартиры имеет вид

- квартира верхнего этажа:

$$t_{\text{int}} = \frac{Q_m + (t^{\text{cp ext}} \left(\frac{A_h}{R_h + \frac{\delta_m}{\lambda_m}} + \frac{A_c}{R_c} + \frac{A_{\text{nm}}}{R_{\text{nm}}} \cdot \psi_{\text{nm}} \right)) + t_{\text{int}}^{\text{nodo}} \cdot \frac{A_{\text{nodo}}}{R_{\text{nodo}}}}{\frac{A_h}{R_h + \frac{\delta_m}{\lambda_m}} + \frac{A_c}{R_c} + \frac{A_{\text{nm}}}{R_{\text{nm}}} \cdot \psi_{\text{nm}} + \frac{A_{\text{nodo}}}{R_{\text{nodo}}}}; \quad (2.31)$$

- квартира верхнего этажа с чердачным перекрытием:

$$t_{\text{int}} = \frac{Q_m + (t^{\text{cp ext}} \left(\frac{A_h}{R_h + \frac{\delta_m}{\lambda_m}} + \frac{A_c}{R_c} \right)) + t_{\text{int}}^{\text{nodo}} \cdot \frac{A_{\text{nodo}}}{R_{\text{nodo}}} + t_{\text{int}}^{\text{nm}} \cdot \frac{A_{\text{nm}}}{R_{\text{nm}}} \cdot \psi_{\text{nm}}}{\frac{A_h}{R_h + \frac{\delta_m}{\lambda_m}} + \frac{A_c}{R_c} + \frac{A_{\text{nm}}}{R_{\text{nm}}} \cdot \psi_{\text{nm}} + \frac{A_{\text{nodo}}}{R_{\text{nodo}}}}; \quad (2.32)$$

- квартира первого этажа:

$$t_{int} = \frac{Q_m + (t^{cp}_{ext} \left(\frac{A_h}{R_h + \frac{\delta_m}{\lambda_m}} + \frac{A_c}{R_c} \right)) + t_{int}^{no\delta} \cdot \frac{A_{no\delta}}{R_{no\delta}} + t_{int}^{n.l} \cdot \frac{A_{n.l}}{R_{n.l}} \cdot \psi_{n.l}}{\frac{A_h}{R_h + \frac{\delta_m}{\lambda_m}} + \frac{A_c}{R_c} + \frac{A_{no\delta}}{R_{no\delta}} + \frac{A_{n.l}}{R_{n.l}} \cdot \psi_{n.l}}; \quad (2.33)$$

- квартира общего расположения:

$$t_{int} = \frac{Q_m + (t^{cp}_{ext} \left(\frac{A_h}{R_h + \frac{\delta_m}{\lambda_m}} + \frac{A_c}{R_c} \right)) + t_{int}^{no\delta} \cdot \frac{A_{no\delta}}{R_{no\delta}}}{\frac{A_h}{R_h + \frac{\delta_m}{\lambda_m}} + \frac{A_c}{R_c} + \frac{A_{no\delta}}{R_{no\delta}}}. \quad (2.34)$$

Получив выражения для определения потенциальной температуры внутреннего воздуха в квартире после «точечного» утепления необходимо провести исследования работы формул для реальных зданий с определёнными параметрами наружных ограждающих конструкций и реальным значением температуры воздуха в квартире для каждого случая расположения квартиры.

2.4.3 Формирование алгоритма определения температуры внутреннего воздуха при «точечном» утеплении

Определение температуры внутреннего воздуха в квартире после «точечного» утепления стен разбивается на следующие шаги:

1. Определение расположения квартиры в здании (угловое, общее, первый этаж, последний этаж и т.п.)
2. Определение типов и характеристик ограждающих конструкций здания в целом и квартиры в частности (наружные стены, внутренние стены, покрытия и перекрытия).
3. Определение температуры воздуха в квартире (t^p_{int} и расчётных климатических параметров (t^{cp}_{ext} , t^p_{ext})
4. Определение тепловых потерь квартиры до точечного утепления Q_m

5. Выбрать теплоизоляционный материал с определёнными характеристиками (δ_m, λ_m)

6. Определить температуру внутреннего воздуха t_{int} при определенных параметрах теплоизоляционного материала

2.4.4 Примеры расчёта температуры внутреннего воздуха t_{int} после «точечного утепления»

2.4.4.1 Панельное здание

Для первого расчёта выбрано 5-ти этажное панельное здание типовой серии I-464. Панели наружных стен здания – трёхслойные железобетонные. Кровля совмещена с перекрытием. Имеются отапливаемые подполья. Для определения характеристик ограждающих конструкций использовался типовой проект для здания типовой серии I-464 [108], а также инвентарное дело.

Для полноты расчёта были выбраны три квартиры – угловая квартира первого этажа, угловая квартира пятого этажа и угловая квартира третьего этажа:

- характеристики ограждающих конструкций.

Наружные стены здания представляют собой трёхслойные железобетонные панели с внутренним теплоизоляционным слоем. Сопротивление теплопередачи R такой панели – $1,996 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Bt}$.

Светопрозрачные конструкции представляют собой окна с двойным остеклением из обычного стекла в спаренных переплётах. Приведенное сопротивление теплопередаче R_0 такой конструкции – $0,4 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Bt}$.

Плиты перекрытия над подпольем железобетонные толщиной $\delta = 0,1 \text{ м}$. Теплопроводность железобетона $\lambda = 1,7 \text{ Вт/m} \cdot \text{°C}$. Сопротивление теплопередаче перекрытия над подпольем – $0,289 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Bt}$.

Внутренние стены квартиры железобетонные толщиной $\delta = 0,12 \text{ м}$. Сопротивление теплопередаче внутренних стен – $0,3 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Bt}$.

Кровля здания совмещена с перекрытием и имеет следующую структуру (рисунок 2.4) :

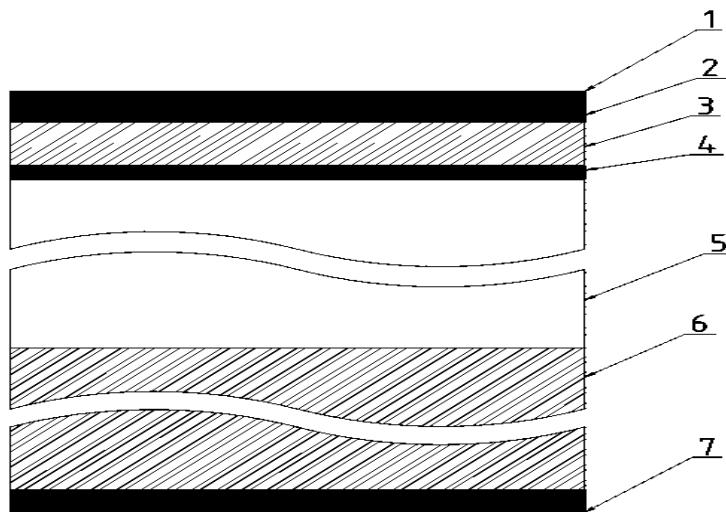


Рисунок 2.4 - Структура совмещённого перекрытия: 1 – защитный слой толщиной 6 мм из просеянного шлака; 2 – рулонный ковёр из рубероида, толщиной 8 мм; 3 – цементная стяжка, толщиной 20 мм; 4 – пароизоляция из одного-двух слоёв рубероида на битумной мастике, толщиной 6 мм; 5 – керамзитобетонный утеплитель, толщиной 150 мм; 6 – железобетонная плита перекрытия, толщиной 100 мм; 7 – слой штукатурки, толщиной 10 мм.

Для шлака коэффициент теплопроводности $\lambda = 0,15 \text{ Вт}/\text{м}\cdot\text{К}$, для рубероида $\lambda = 0,17 \text{ Вт}/\text{м}\cdot\text{К}$, для цементного раствора $\lambda = 0,76 \text{ Вт}/\text{м}\cdot\text{К}$, для керамзитобетона $\lambda = 0,16 \text{ Вт}/\text{м}\cdot\text{К}$.

Сопротивления теплопередаче кровли составляет $R = 1,32 \text{ м}^2\cdot\text{°K}/\text{Вт}$.

Используя проектную документацию здания [108], данные измерений были получены необходимые для расчёта характеристики ограждающих конструкций для исследуемых квартир различных вариантов расположения (таблица 2.1).

Таблица 2.1 Характеристики ограждающих конструкций квартир

Характеристика	Ед. изм.	Значение
1	2	3
Площадь утепляемых наружных стен, A_h	м^2	21,7
Сопротивление теплопередаче наружных стен, R_h	$\text{м}^2\cdot\text{°K}/\text{Вт}$	1,996
Площадь внутренних стен, выходящих в подъезд, $A_{под}$	м^2	14,4

1	2	3
Сопротивление теплопередаче стен, выходящих в подъезд, $R_{\text{под}}$	$\text{м}^2 \cdot \text{°К}/\text{Вт}$	0,3
Площадь перекрытия полов (для 1-го этажа), $A_{\text{пл}}$	м^2	31,41
Сопротивление теплопередаче перекрытия полов, $R_{\text{пл}}$	$\text{м}^2 \cdot \text{°К}/\text{Вт}$	0,289
Площадь перекрытия над верхним этажом (кровля совмещена с перекрытием), $A_{\text{пн}}$	м^2	31,41
Сопротивление теплопередаче перекрытия над верхним этажом, $R_{\text{пн}}$	$\text{м}^2 \cdot \text{°К}/\text{Вт}$	1,32
Площадь окон, A_c	м^2	7,2
Сопротивление теплопередаче окон, R_c	$\text{м}^2 \cdot \text{°К}/\text{Вт}$	0,568

Учитывая полученные характеристики ограждающих конструкций, необходимо определить тепловые потери через отдельные ограждающие конструкции (таблица 2.2).

- *расчёт тепловых потерь*

Таблица 2.2 Данные по тепловым потерям

Тепловые потери	Ед. изм	Значение
Тепловые потери через наружные стены, Q_h	Вт	202,21
Тепловые потери через перекрытия верхнего этажа (для квартир верхнего этажа), $Q_{\text{пн}}$	Вт	376,62
Тепловые потери через перекрытия пола (для квартир первого этажа), $Q_{\text{пл}}$	Вт	260,84
Тепловые потери в подъезд, $Q_{\text{под}}$	Вт	96,00
Тепловые потери через окна, Q_c	Вт	235,77

Далее для расчёта тепловых потерь необходимо определить расчётные данные по температурам внутреннего и наружного воздуха, а также характеристики теплоизоляционного материала для «точечного» утепления. В качестве теплоизоляционного материала для утепления наружной стены будем использовать пенопласт марки ФФ-170, его характеристики и данные по температурам представлены в таблице 2.3

Таблица 2.3 Расчётные характеристики

Параметр	Ед. изм.	Значение
Фактическая температура внутреннего воздуха, t_{int}^{ϕ}	°C	18
Средняя температура воздуха за отопительный период, t_{ext}^{cp}	°C	-0,6
Температура воздуха в подъезде, $t_{int}^{под}$	°C	16
Температура воздуха в подвале (подполье), $t_{int}^{под}$	°C	14
Толщина предполагаемого теплоизоляционного слоя, δ_h	м	0,15
Теплопроводности материала теплоизоляционного слоя, λ_h	Вт/м·°K	0,037

В зависимости от расположения квартиры в здании общие тепловые потери через ограждающие конструкции будут отличаться. Данные по общим тепловым потерям представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 Общие тепловые потери рассматриваемых квартир в зависимости от расположения в здании

Общие тепловые потери Q_t	Ед. изм.	Значение
Угловая квартира 3-го этажа	Вт	533,99
Угловая квартира пятого этажа	Вт	910,61
Угловая квартира первого этажа	Вт	811,44

- расчёт температуры внутреннего воздуха

Потенциальная температура воздуха в квартире при различном расположении квартиры представлена в таблице 2.5.

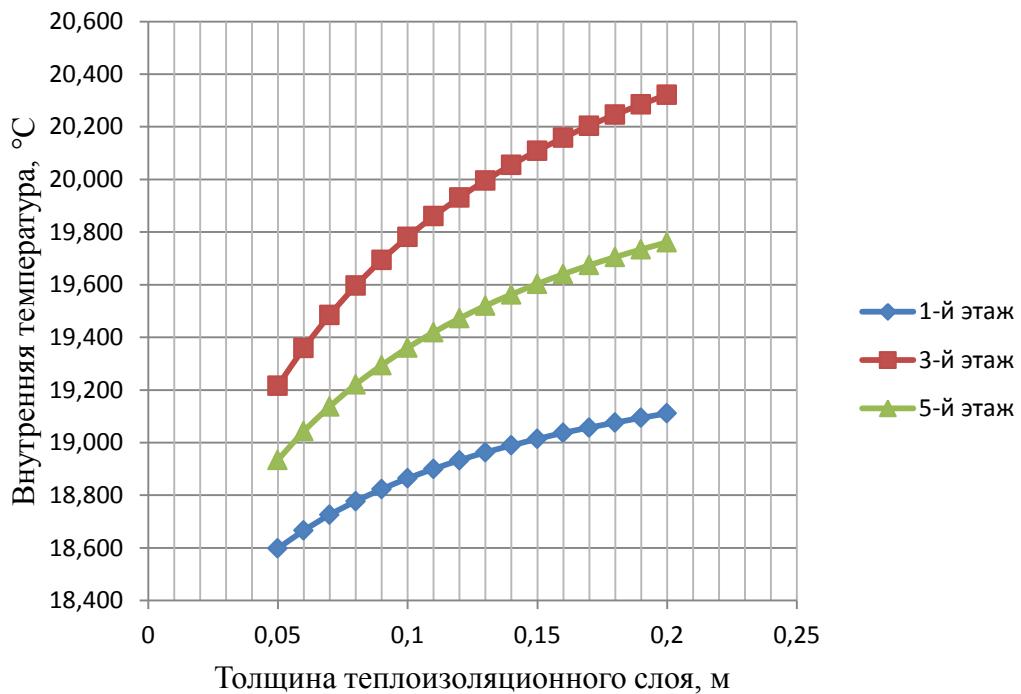
Таблица 2.5 Значение температуры внутреннего t_{int} воздуха после проведения «точечного» утепления.

Расположение квартиры	Ед. изм.	Значение
Угловая квартира 3-го этажа	°C	20,1
Угловая квартира пятого этажа	°C	19,0
Угловая квартира первого этажа	°C	19,6

Как было раннее отмечено, расчёт температуры внутреннего воздуха проводился для средней за отопительный период температуры наружного воздуха. Однако, учитывая нелинейную зависимость температуры t_{int} от расчётного значения температуры наружного воздуха t_{ext} , можно предположить, что в зависимости от изменения температуры наружного воздуха, температура внутреннего воздуха также будет меняться. В связи с этим, необходимо исследовать зависимость t_{int} после «точечного» утепления от наружной температуры воздуха. Для начала отопительного периода необходимо, чтобы среднесуточная температура воздуха t_{int} на протяжении 5-ти дней не поднималась выше 8°C. Минимальной расчётной температурой воздуха, при которой тепловая нагрузка отопления обеспечивает нормативное значение температуры внутреннего воздуха, является средняя температура наиболее холодной пятидневки января (для г. Донецк она составляет -22°C). Таким образом, исследуем зависимость t_{int} от t_{ext} на промежутке от +8°C до -22°C при неизменных параметрах характеристиках конструкций здания и теплоизоляционного материала.

- определение зависимости t_{int} от δ

Для расчёта «точечного» утепления был использован самый популярный для этих целей материал – пенопласт. Для наружного утепления квартир используется пенопласт достаточно высокой плотности, что обуславливается условиями монтажа. При этом толщина дополнительного теплоизоляционного слоя также оказывает влияние на потенциальную температуру внутреннего воздуха. С увеличением толщины теплоизоляционного слоя также увеличиваются затраты на теплоизоляционный материал. В связи с этим, исследуем зависимость потенциальной температуры внутреннего воздуха от толщины теплоизоляционного слоя $t_{int} = f(\delta_t)$ с установленным значением коэффициента теплопроводности. Толщина плит пенопласта на рынке теплоизоляционных материалов изменяется от 0,05 до 0,2 м. На рисунке 2.5 изображены зависимости $t_{int} = f(\delta_t)$ для различных вариантов расположения квартир.

Рисунок 2.5 Зависимость $t_{int} = f(\delta)$

С помощью графиков можно определить необходимую для проведения «точечного» утепления толщину теплоизоляционного слоя.

В целом, можно сказать, что «точечное» утепление в квартирах панельного здания в параметрами, при средней температуре наружного воздуха за отопительный период – 0,6 °C и при существующей температуре внутреннего воздуха в квартире 18 °C даёт следующие результаты:

- для угловой квартиры первого этажа температура t_{int} составила 19,6 °C;
- для угловой квартиры третьего этажа температура t_{int} составила 20,1 °C;
- для угловой квартиры пятого этажа температура t_{int} составила 19 °C.

Максимальное повышение температуры внутреннего воздуха наблюдается в угловой квартире третьего этажа – 2,1 °C, а в квартирах первого и пятого этажей повышение температуры оно незначительно и с учётом неравномерного распределения тепла в помещении может остаться незамеченной жильцами. Такая ситуация связана с тем, что для рассматриваемого здания в квартирах

первого и пятого этажей доля тепловых потерь через наружные стены равна, соответственно, 25 и 22 %. Невысокая доля тепловых потерь через наружные стены связана с особенностями конструкции здания и с достаточно высоким значением сопротивления теплопередаче наружных стен – $1,996 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Bт}$, которое хоть и не соответствует современным нормам для ограждающих конструкций жилых зданий – $2,72 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Bт}$ (для г. Донецк), однако превышает среднее значение у существующих зданий советской застройки. Для исследования зависимости эффективности «точечного» утепления от доли тепловых потерь через наружные стены необходимо рассмотреть здание с более низким значением сопротивления теплопередаче наружных стен.

2.4.4.2 Пятиэтажный кирпичный дом типовой серии 1-447С

Расчет параметров для здания серии 1-447 с представлен в Приложении В.

Графики зависимости $t_{int} = f(\delta)$ для каждого варианта расположения квартиры в здании отображены на рисунке 2.6.

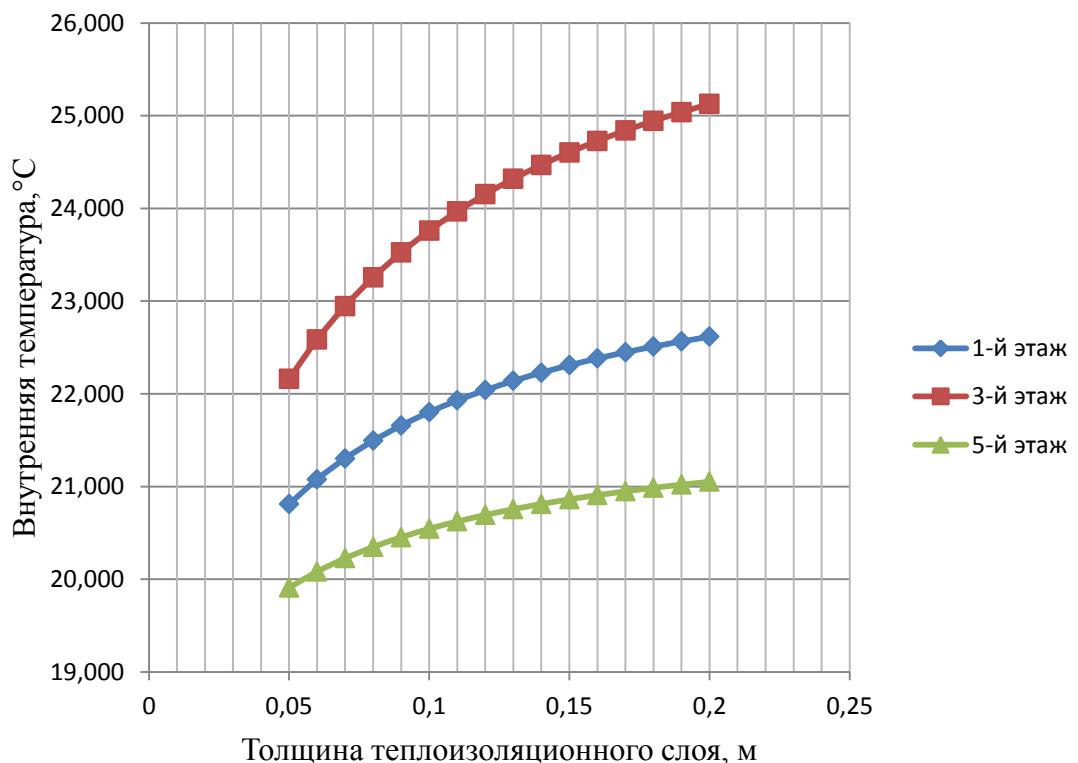


Рисунок 2.6 Зависимость $t_{int} = f(\delta)$

Результаты расчетов значения внутренней температуры:

- для угловой квартиры первого этажа температура t_{int} составила 21,8 °C;
- для угловой квартиры третьего этажа температура t_{int} составила 23,8 °C;
- для угловой квартиры пятого этажа температура t_{int} составила 20,5 °C.

Максимальное повышение температуры внутреннего воздуха наблюдается в угловой квартире третьего этажа – 5,8 °C.

2.4.5 Анализ результатов расчёта

Результаты расчёта потенциальной температуры внутреннего воздуха для трёх вариантов расположения квартир в панельном здании серии 1-464 и кирпичном здании серии 1-447 для наглядности представлены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 Результаты расчёта

Расположение квартиры	Температура t_{int} , °C	
	Панельное здание	Кирпичное здание
Угловая 1-го этажа	19,6	21,8
Угловая 3-го этажа	20,1	23,8
Угловая 5-го этажа	19	20,5

При планировании проведения «точечного» утепления предварительно оценить его эффективность можно проанализировав долю потерь через наружные стены в общих теплопотерях квартиры. Установлено, что чем выше доля тепловых потерь через наружные стены в общем тепловом балансе, т.е. чем больше тепла теряется через наружные стены, тем большую температуру внутреннего воздуха можно получить после реализации «точечного» утепления. Таким образом, наиболее эффективным «точечное» утепления будет для угловых квартир.

Зависимость повышения температуры Δt , % от доли тепловых потерь через наружные стены Q_h , % для панельного здания типовой серии 1-464 и кирпичного здания типовой серии 1-464 представлена на рисунке 2.7

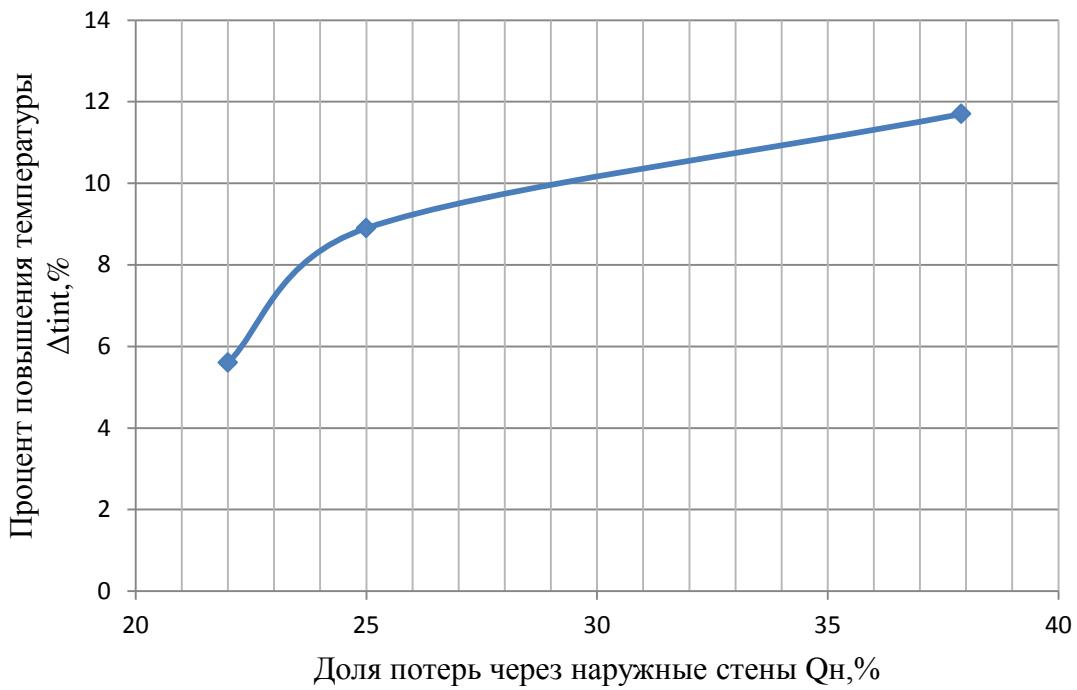


Рисунок 2.7 - Зависимость повышения температуры $\Delta t, \%$ от доли тепловых потерь через наружные стены $Q_h, \%$ для панельного здания типовой серии 1-464

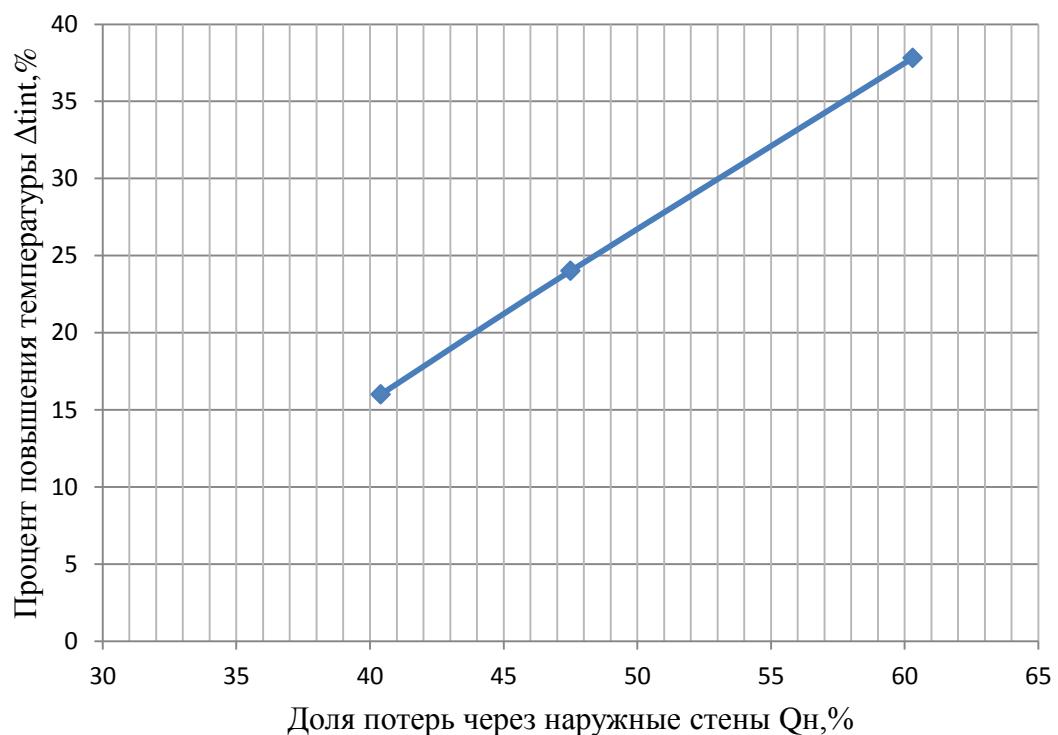


Рисунок 2.8 - Зависимость повышения температуры $\Delta t, \%$ от доли тепловых потерь через наружные стены $Q_h, \%$ для кирпичного здания типовой серии 1-447

На рисунках 2.7 и 2.8 наглядно показана зависимость повышения температуры внутреннего воздуха после проведения «точечного» утепления от доли тепловых потерь через наружные стены в общих тепловых потерях помещения.

2.5 Выводы по разделу

На примере жилого здания типовой серии 1-464 были рассчитаны параметры эффективности для четырех различных теплоизоляционных материалов. Выделен наиболее эффективный теплоизоляционный материал для реконструкции – пенополистирол ПБС-С.

Получены выражения для определения эффективной толщины теплоизоляционного слоя. Получено значение оптимального диапазона толщины пенополистирола ПБС-С при реконструкции кирпичного здания типовой серии 1-447 – [0,063 - 0,2] м.

Получены выражения для определения потенциальной температуры воздуха в помещении после проведения «точечного» утепления.

На примере жилых зданий типовых серий 1-464 и 1-447 проведен анализ эффективности «точечного» утепления для различного расположения квартир. При этом были получены значения температур в помещении после утепления наружных стен квартир:

- типовая серия 1-464:

- Угловая 1-го этажа – 19,6 °C
- Угловая 3-го этажа - 20,1°C
- Угловая 5-го этажа - 19°C

- типовая серия 1-447:

- Угловая 1-го этажа – 21,8°C
- Угловая 3-го этажа - 23,8°C
- Угловая 5-го этажа - 20,5°C

Установлено, что чем выше доля тепловых потерь через наружные стены в общем тепловом балансе, т.е. чем больше тепла теряется через наружные стены,

тем большую температуру внутреннего воздуха можно получить после реализации «точечного» утепления. Таким образом, наиболее эффективным «точечное» утепления будет для угловых квартир.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ НАВЕСНЫХ ФАСАДОВ С ВЕНТИЛИРУЕМОЙ ВОЗДУШНОЙ ПРОСЛОЙКОЙ ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ

3.1 Сопротивление теплопередаче воздушной прослойки

Особенностью определения сопротивления теплопередаче воздушной прослойки является наличие двух составляющих – теплообмена конвекцией и теплообмена излучением. Конвективный теплообмен связан с циркуляцией воздуха и при расчете воздушной прослойки необходимо учитывать скорость движения воздуха. В связи с этим, определение сопротивления теплопередаче воздушной прослойки имеет свои особенности. Согласно рекомендациям по проектированию навесных фасадных систем с вентилируемым воздушным зазором для нового строительства и реконструкции зданий [90], сопротивление теплопередаче воздушной прослойки определяется по формуле

$$R_{np} = \frac{1}{5,5 + 5,7 \cdot V_{np} + a_{\lambda}}, \quad (3.1)$$

где a_{λ} - коэффициент лучистого теплообмена;

V_{np} - скорость движения воздуха в воздушной прослойке, м/с.

Согласно [30], сопротивление теплопередаче воздушной прослойки определяется по формуле

$$R_{np} = \frac{1}{0,5 \cdot a_{\kappa} + a_{\lambda}}, \quad (3.2)$$

где a_{κ} - коэффициент конвективного теплообмена.

Коэффициент лучистого теплообмена a_{λ} определяется выражением [30]

$$a_{\lambda} = \xi_{np} \cdot c_0 \cdot b \cdot \varphi, \quad (3.3)$$

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

c_0 - коэффициент излучения абсолютно черного тела;

ξ_{np} - приведенный коэффициент излучения, который определяется выражением

$$\xi_{np} = \frac{1}{\frac{1}{\xi_{bh1}} + \frac{1}{\xi_{bh2}} - 1}, \quad (3.4)$$

где ξ_{bh1}, ξ_{bh2} - относительные коэффициенты излучения материала внутренних стенок воздушной прослойки (согласно табличным данным);

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

Подставив 3.4 в 3.3, получим выражение для определения коэффициента лучевого теплообмена

$$a_{\lambda} = \frac{c_0 \cdot b \cdot \varphi}{\frac{1}{\xi_{bh1}} + \frac{1}{\xi_{bh2}} - 1}. \quad (3.5)$$

Согласно [30], среднее значение коэффициента конвективного теплообмена a_k для воздушной прослойки определяется по формуле

$$a_k = (0,896 + 1,51 \cdot 10^{-3} \cdot t) \cdot \left(\frac{(V_{np}^{0,2} \cdot \Delta t^{0,1})}{d^{0,5}} \cdot \varepsilon \right), \quad (3.6)$$

где V_{np} - то же, что и в 3.1;

Δt - разность между средней температурой воздуха в прослойке и температурой поверхности прослойки, $^{\circ}\text{C}$;

$$\Delta t = t_{cp} - t_{np}^{cm}, \quad (3.7)$$

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

$$t = \frac{t_{cp} - t_{np}^{cm}}{2}, \quad (3.8)$$

d – эквивалентный диаметр воздушной прослойки, м, который равен

$$d = 2 \cdot \delta_{np}, \quad (3.9)$$

где δ_{np} - ширина воздушной прослойки, м.

ε - коэффициент, зависящий от отношения l/d , где l – высота канала. При $l/d > 50$ (как правило, здания выше 4-х этажей), $\varepsilon = 1$.

При температуре воздуха в прослойке близкой к 0°C и при $l/d > 50$, формула 3.6 принимает вид

$$a_\kappa = 3,51 \cdot V_{np}^{0,8} \cdot d^{-0,2}, \quad (3.10)$$

Скорость воздуха в воздушной прослойке определяется по формуле

$$V_{np} = \sqrt{\frac{\kappa \cdot (\kappa_1 - \kappa_3) \cdot V_h^2 + 0,08 \cdot H \cdot (t_{cp} - t_h)}{\sum \xi}}, \quad (3.11)$$

где κ_1, κ_3 - аэродинамические коэффициенты на разных стенах здания;

V_h - скорость движения наружного воздуха, м/с;

κ – коэффициент изменения скорости воздуха по высоте;

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

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

t_h - температура наружного воздуха, °C;

$\sum \xi$ - сумма коэффициентов местных сопротивлений (для прослойки, в которой местные сопротивления – это только вход/выход с двумя поворотами $\sum \xi = 3,5$).

Выражение $\kappa \cdot (\kappa_{\text{в}} - \kappa_{\text{в}}) \cdot V_{\text{в}}^2$ представляет собой составляющую, которая учитывает скорости движения наружного воздуха на скорость движения воздуха в прослойке. Учитывая непостоянство воздействия наружного воздуха на стены здания, это составляющей можно пренебречь. Тогда выражение для нахождения скорости наружного воздуха $V_{\text{в}}$ принимает вид

$$V_{np} = \sqrt{\frac{0,08 \cdot H \cdot (t_{cp} - t_{\text{в}})}{\sum \xi}}. \quad (3.12)$$

Средняя температура воздуха воздушной прослойки, согласно, определяется по формуле

$$t_{cp} = t_0 - (t_0 - t_{\text{в}}) \cdot \frac{X_0}{H} \cdot (1 - e^{-\frac{H}{X_0}}), \quad (3.13)$$

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

$t_{\text{в}}$ - температура на входе в прослойку, °C;

X_0 - коэффициент, характеризующий высоту, на которой разность температур

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

Предельная температура воздуха в прослойке t_0 определяется выражением

$$t_0 = \frac{\frac{t_{\text{в}}}{R_{cm}^0} + \frac{t_{\text{в}}}{R_{\delta}}}{\frac{1}{R_{cm}^0} + \frac{1}{R_{\delta}}}, \quad (3.14)$$

где R_{cm}^0 - сопротивление теплопередаче участка конструкции между внутренней поверхностью и воздушной прослойкой, $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{К}/\text{Вт}$

$$R_{cm}^0 = \frac{1}{a_{int}} + (R_{cm} + R_{ym}) \cdot r + \frac{1}{a_{np}}. \quad (3.15)$$

Коэффициент X_0 определяется по формуле

$$X_0 = \frac{C_e \cdot V_{np} \cdot \delta_{np} \cdot \rho_e}{\frac{1}{R_{cm}^0} + \frac{1}{R_o}}, \quad (3.16)$$

где C_e - удельная теплоёмкость воздуха (1005 Дж/кг·°К);

δ_{np} - ширина воздушной прослойки, м;

ρ_e - плотность воздуха в прослойке, кг/м³.

Как видим, скорость движения воздуха в прослойке V_{np} присутствует в 3.6, 3.10 и 3.16, в то же время, средняя температура воздуха в воздушной прослойке t_{cp} должна быть известна при нахождении V_{np} . Таким образом, существует необходимость совместного определения значений V_{np} и t_{cp} . Сделать это можно следующим образом: изначально необходимо задаться первоначальным значением t_{cp} и определить скорость движения воздуха в воздушной прослойке. В дальнейшем используется полученное значение V_{np} для уточнения значения средней температуры воздуха воздушной прослойки t_{cp} . Для этого предлагается воспользоваться зависимостью, которая была получена путем аппроксимации экспериментально полученных зависимостей при исследовании различных существующих систем навесных вентилируемых фасадов

$$t_{cp} = t_{ex} - H_0 \cdot (-0,035) \cdot \ln H_0 - 0,1568 \quad (3.17)$$

где H_0 - высота канала воздушной прослойки, м.

С помощью полученного согласно 3.17 значения средней температуры воздуха в прослойке определяем скорость движения воздуха в прослойке, а после

– уточнение значения температуры t_{cp} по формуле 3.13. В дальнейшем уточненные значения V_{np} и t_{cp} можно использовать для расчетов необходимых теплотехнических параметров воздушной прослойки и конструкции в целом.

3.2 Коэффициент теплотехнической однородности

Коэффициент теплотехнической однородности r отображает наличие в ограждающей конструкции участков со значительно большей теплопроводностью, чем вся конструкция, т.е. теплопроводных включений. Коэффициент теплотехнической однородности определяется по формуле

$$r = \frac{R_{np}^*}{R_{cm}}, \quad (3.18)$$

где R_{np}^* - приведенное сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции, т.е. с учетом теплопроводных включений, $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$;

R_{cm} - сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции без теплопроводных включений, $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$.

При расчете теплотехнических параметров ограждающих конструкций с навесными вентилируемыми фасадами существует два основных способа определения коэффициента теплотехнической однородности. Первый – с использованием табличных значений, приведенных в методических рекомендациях по проектированию навесных фасадов. Однако в этом случае получение достоверных результатов маловероятно, т.к. значения коэффициента теплотехнической однородности, приведенные в рекомендациях, не учитывают материал, из которых изготовлен крепежный элемент, а также не учитывают материал ограждающей конструкции здания. Второй способ – путем расчета температурных полей. С использованием ЭВМ определяются температурные поля и тепловой поток через конструкции с теплопроводным включением и без него. Коэффициент теплотехнической однородности при этом определяют из отношения тепловых потоков

$$r = \frac{Q_{cm}}{Q_{np}}, \quad (3.19)$$

где Q_{cm} - тепловой поток через ограждающую конструкцию без теплопроводного включения, Вт;

Q_{np} - тепловой поток через ограждающую конструкцию с теплопроводным включением, Вт.

Зная количество кронштейнов на единицу площади конструкции можно определить коэффициент теплотехнической однородности конструкции.

В дальнейшем для выбранного типа здания будет производиться расчет температурных полей для участка стенки с кронштейном.

3.3 Расчета эффективности навесного вентилируемого фасада

Для расчета навесного фасада с вентилируемой воздушной прослойкой в качестве исследуемого объекта примем жилое здание типовой серии 1-447с со стенами из силикатного кирпича толщиной 0,5 м (раздел 2). Характеристики конструкции, а также климатические и экономические параметры, необходимые для расчета, представлены в таблице 3.1. Характеристики системы навесного вентилируемого фасада представлены в таблице 3.2

Таблица 3.1 Характеристики исследуемого объекта

Параметр	Ед.изм.	Значение
1	2	3
Площадь изолируемой поверхности, $A_{ст}$	м^2	2468,97
Толщина наружной стены, δ	м	0,5
Теплопроводность материала наружной стены слоя, λ	$\text{Вт}/\text{м}\cdot\text{°К}$	0,7
Высота здания, Н	м	13,5
Продолжительность отопительного периода, Z_{ht}	сут	183
Продолжительность отопительного периода, Z_{ht}	с	15811200

1	2	3
Расчёчная температура внутреннего воздуха, t_{int}	°C	20
Градусо-сутки отопительного периода, D_d	°C·сут	3769,8
Расчётный коэффициент а		0,00035
Расчётный коэффициент б		1,4
Коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности, a_{int}	Вт/м ² ·°К	8,7
Коэффициент теплоотдачи наружной поверхности, a_{ext}	Вт/м ² ·°К	23
Расчёчная температура наружного воздуха, t_{ext}	°C	-22
Средняя температура воздуха за отопительный период, t_{ext}^{cp}	°C	-0,6
Экономические параметры		
Номинальная ставка дисконтирования, E_n	год ⁻¹	0,1
Темп инфляции, а	год ⁻¹	0,06
Стоимость тепловой энергии, с т.э.	руб/Гкал	1534

Таблица 3.2 Параметры системы навесного вентилируемого фасада

Параметр	Ед.изм.	Значение
Толщина теплоизоляционного слоя, δ_t	м	0,15
Теплопроводность теплоизоляционного слоя, λ_t	Вт/м·°C	0,056
Удельная стоимость теплоизоляционного материала, с _{т.м.}	руб/м ³	900
Толщина декоративного слоя, δ_d	м	0,03
Теплопроводность декоративного слоя, λ_d	Вт/м·°C	3,5
Коэффициент теплотехнической однородности, г		0,84
Толщина воздушной прослойки, δ_{pr}	м	0,06
Коэффициент излучения ξ_{bh1}		0,45
Коэффициент излучения ξ_{bh2}		0,75
Удельная стоимость монтажных работ (с учётом декоративного слоя), с _{м.}	руб/м ²	1100
Срок службы, Т _{сл}	лет	30

Представленный в таблице коэффициент теплотехнической однородности был определен методом построения температурных полей в среде ANSYS. Описание нахождения коэффициента теплотехнической однородности представлено в 3.4

3.4 Определение коэффициента теплотехнической однородности r

Как было сказано ранее, теплопроводным включением в системах навесных фасадов с вентилируемой воздушной прослойкой является кронштейн с анкерным болтом, который служит для монтажа вертикальных и горизонтальных профилей. Анкерный болт выполнен из стали и имеет следующие параметры: диаметр $\varnothing = 10$ мм, длина $l = 120$ мм. Кронштейн П-образной формы выполнен из стали и имеет следующие параметры: высота $h = 210$ мм (соответственно толщине теплоизоляционного слоя и толщи не воздушной прослойки), ширина $b = 40$ мм, толщина $\delta = 2$ мм. При монтаже конструкции в рассматриваемой системе кронштейны располагаются с шагом 600×900 мм. Другими словами, на 1 м^2 конструкции приходится $1,85 \approx 2$ кронштейна.

Первым шагом при определении коэффициента теплотехнической однородности участка конструкции с кронштейном и анкерным болтом является построение геометрической модели в среде ANSYS. Строится участок наружной ограждающей конструкции $600 \times 900 \times 500$ мм. Далее происходит построение геометрической модели несущего кронштейна с анкерным болтом, который заглубляется в несущую конструкцию на расстояние 105 мм. В дальнейшем строится слой теплоизоляционного материала соответствующей толщины. Геометрическая модель участка конструкции представлена на рисунках 3.1 и 3.2.

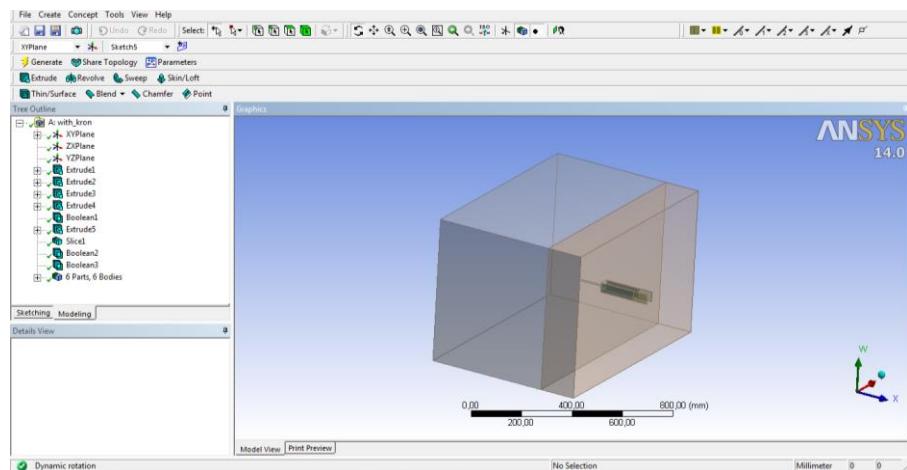


Рисунок 3.1- Геометрическая модель участка конструкции с кронштейном

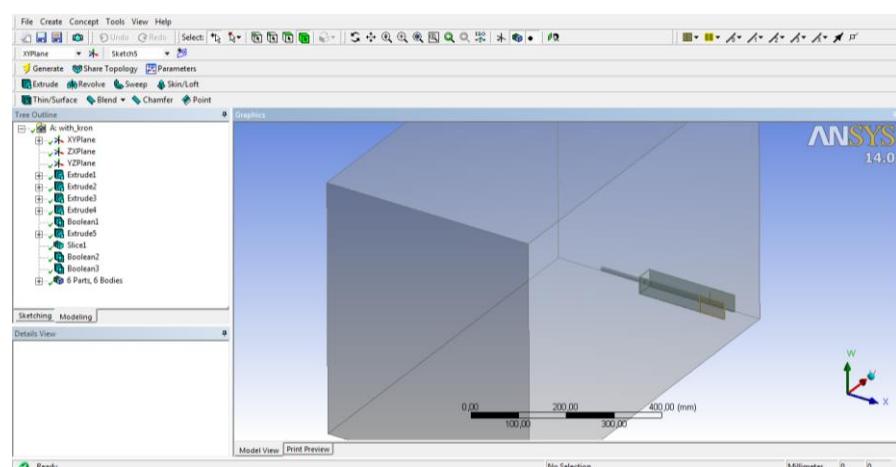


Рисунок 3.2 - Геометрическая модель участка конструкции с кронштейном

Следующим шагом является задание теплотехнических характеристик элементов геометрической модели в разделе Engineering Data (рисунок 3.3).

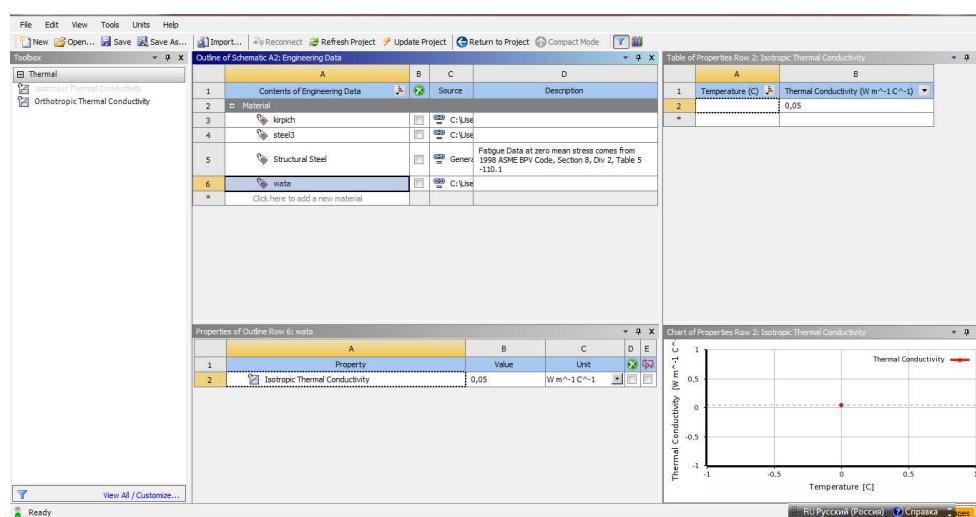


Рисунок 3.3 – Задание теплотехнических характеристик элементов модели

Далее в разделе Model задаются граничные условия для расчета температурных полей и теплового потока. В рассматриваемом случае это условия третьего рода, т.е. задаются температуры и коэффициенты конвективного теплообмена для внутренней и наружной поверхности (рисунок 3.4). В дальнейшем производится построение сетки конечных элементов (рисунок 3.5).

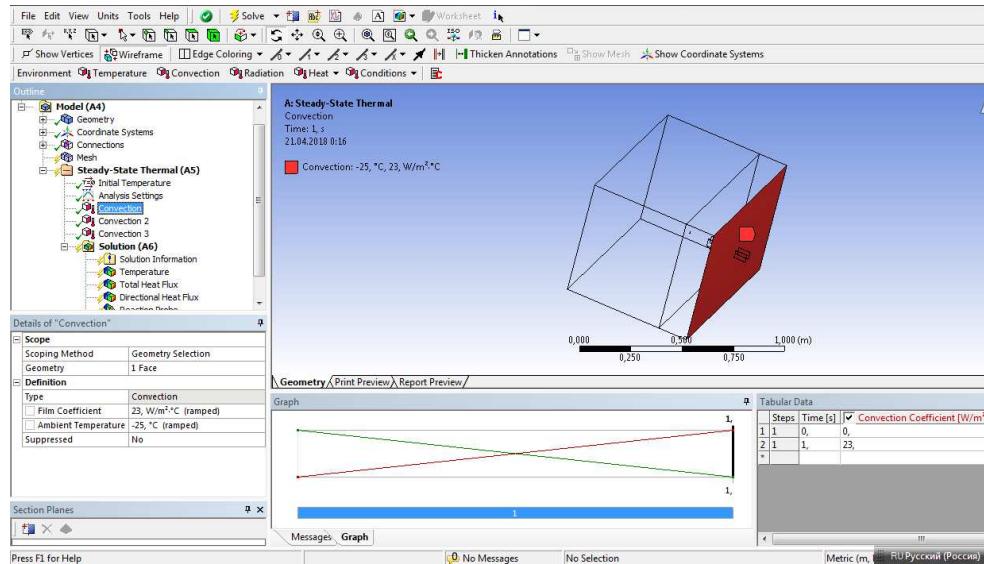


Рисунок 3.4 - Задание граничных условий

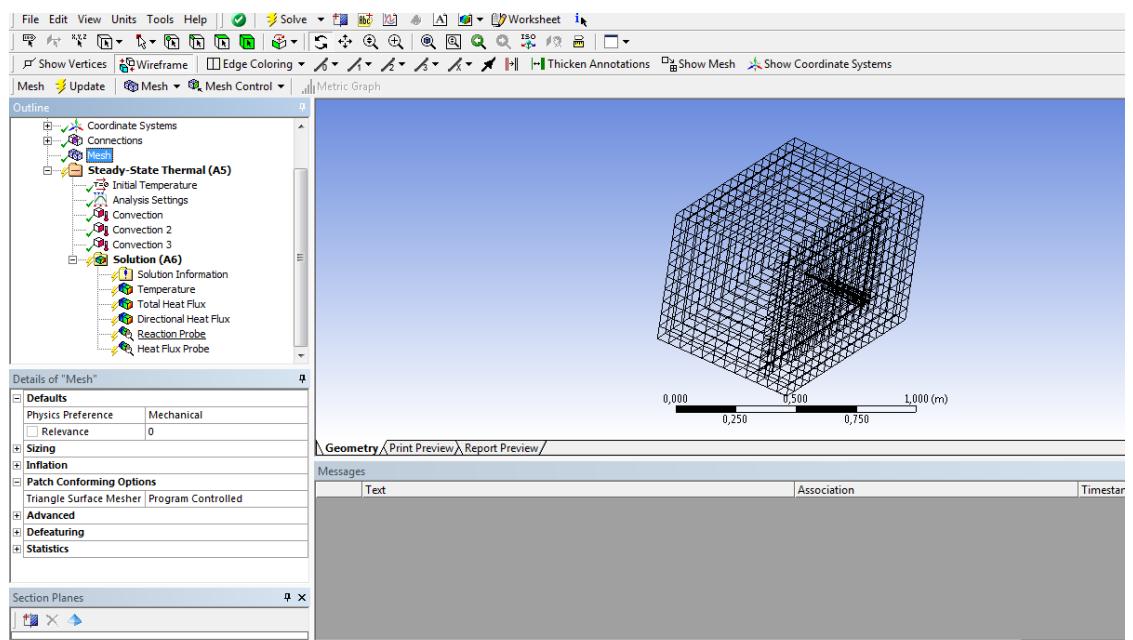


Рисунок 3.5 - Построение сетки

В качестве результатов расчета мы получаем распределение температур по участку конструкции с кронштейном (рисунок 3.6; 3.7) и значение суммарного теплового потока через рассматриваемый участок конструкции (рисунок 3.8).

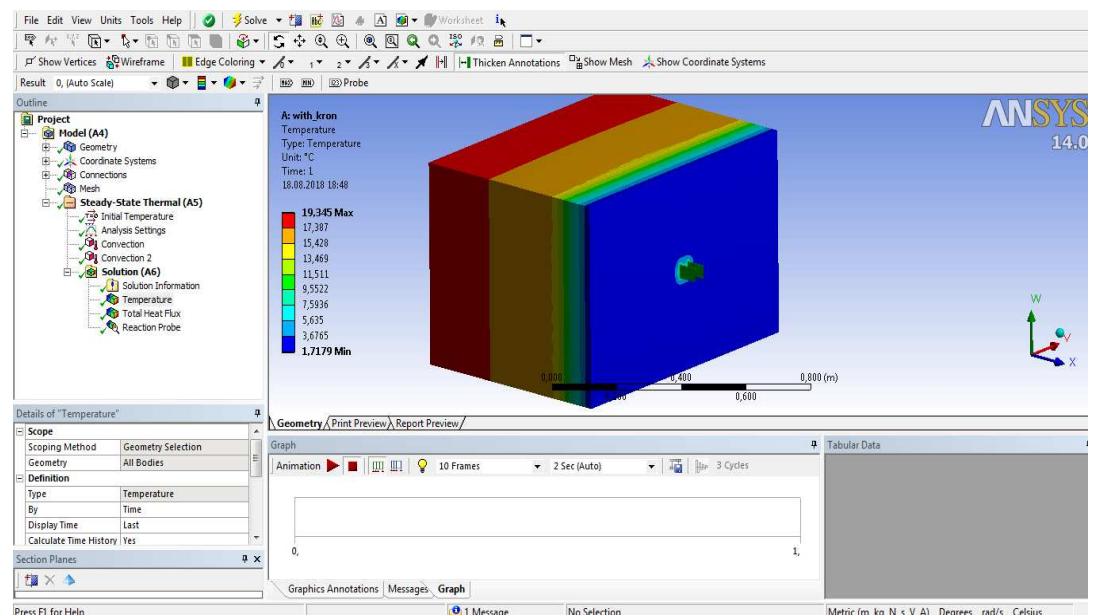


Рисунок 3.6 – Распределение температур в участке конструкции

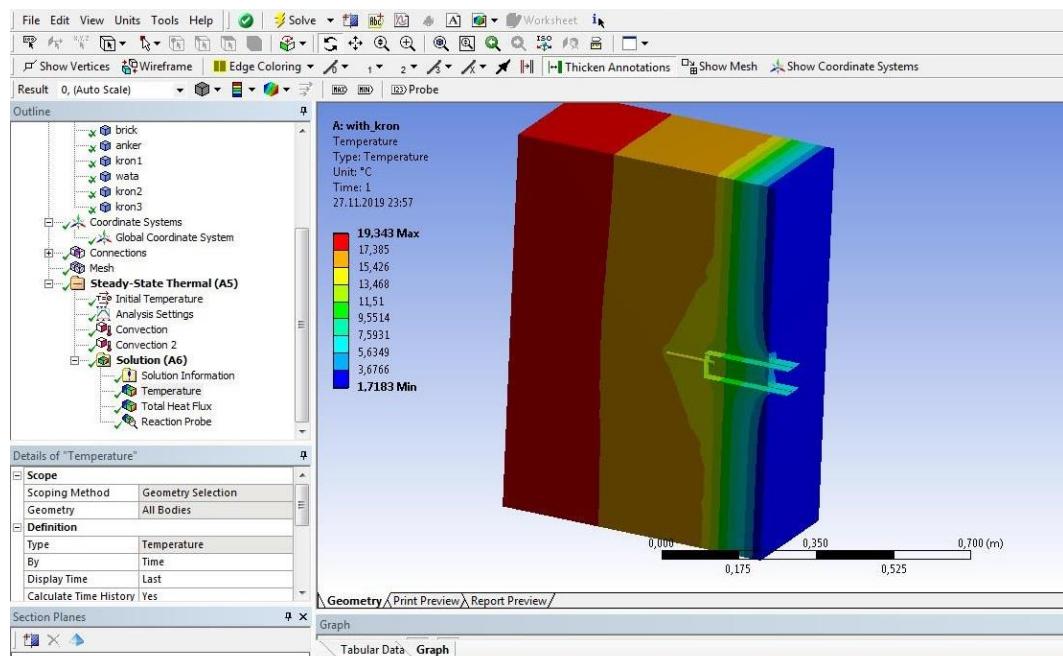


Рисунок 3.7 – Распределение температур в участке конструкции (разрез)

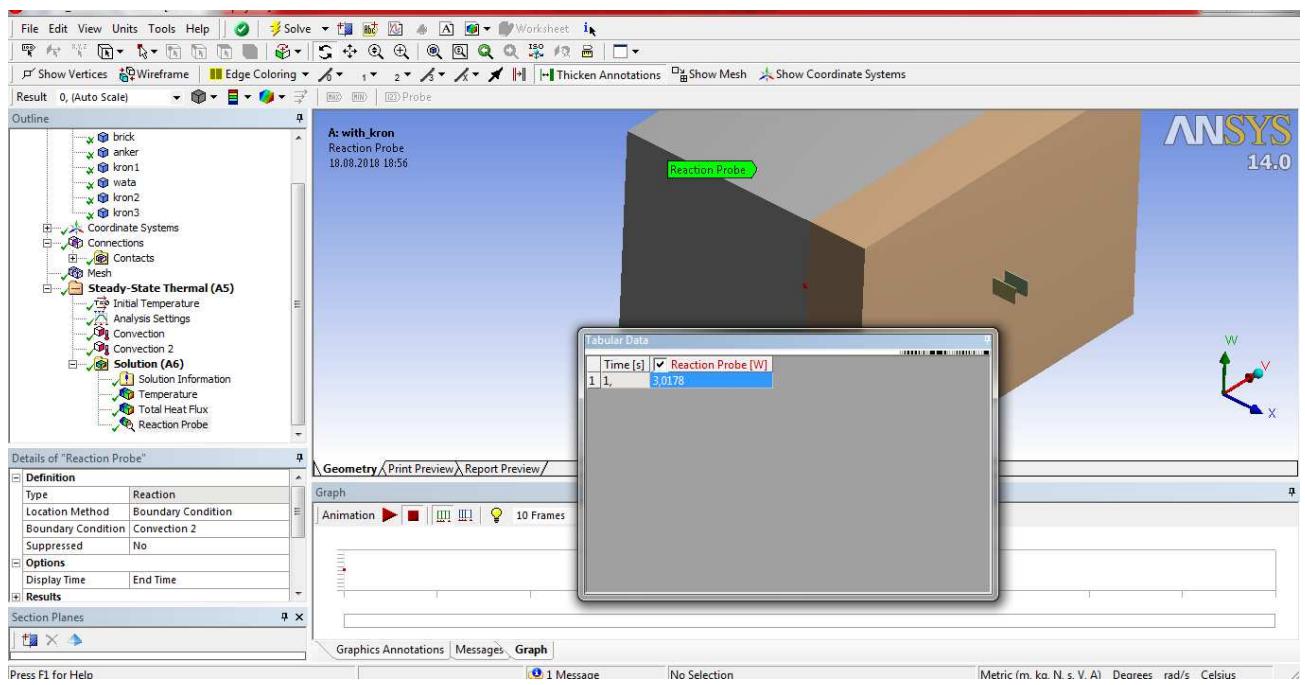


Рисунок 3.8 – Значение суммарного теплового потока

Для определения коэффициента теплотехнической однородности конструкции необходимо определить тепловой поток соразмерного участка конструкции, но без кронштейна и анкерного болта. Распределение температур в участке конструкции без кронштейна и тепловой поток через этот участок представлены на рисунках 3.9 и 3.10.

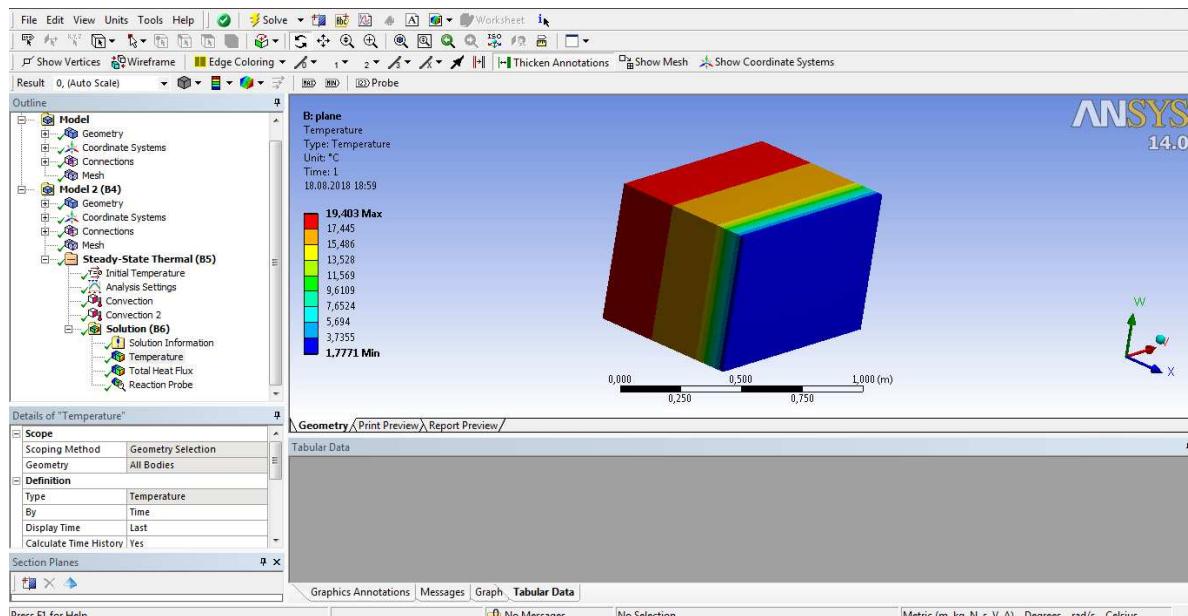


Рисунок 3.9 – Распределение температур участка конструкции без кронштейна

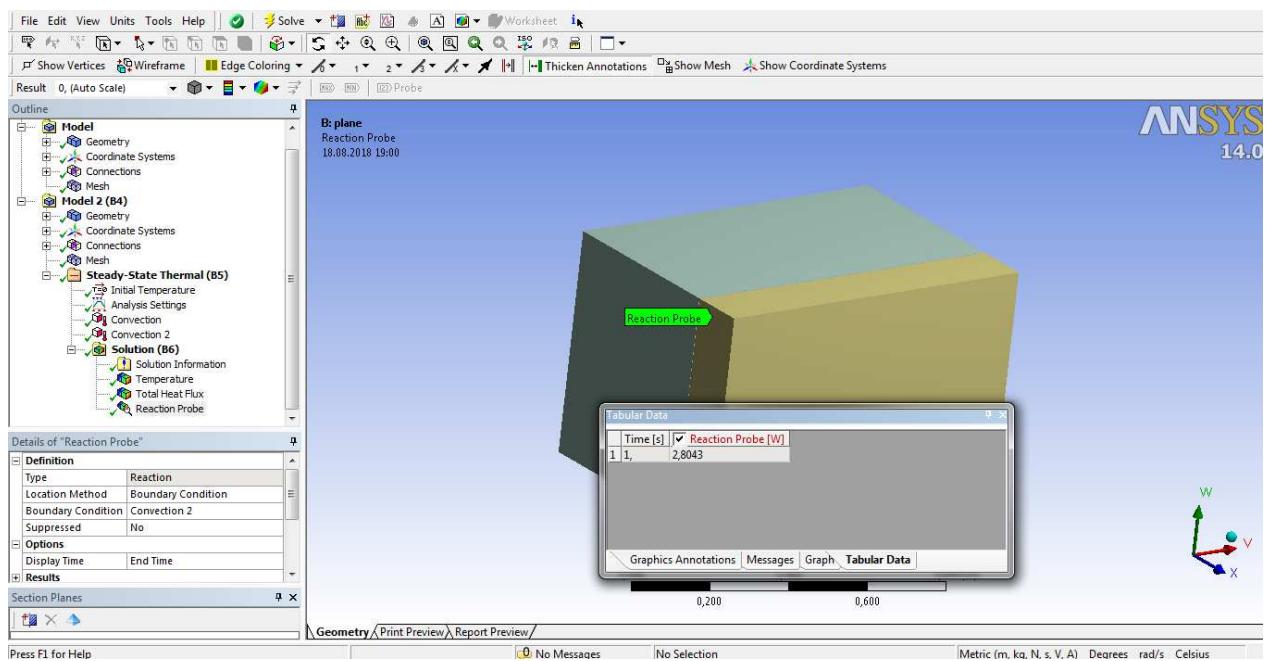


Рисунок 3.10 – Тепловой поток участка конструкции без кронштейна

В таблице 3.3 представлены результаты исследования участка ограждающей конструкции с кронштейном и анкерным болтом и коэффициент теплотехнической однородности r .

Таблица 3.3 – Результаты расчета

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

Таким образом, для текущего расчета с установленными параметрами системы навесного вентилируемого фасада – толщиной теплоизоляционного слоя и слоя воздушной прослойки, размерами и шагом расположения крепежных элементов – коэффициент теплотехнической однородности r равен 0,93.

3.5 Результаты расчета параметров эффективности навесного вентилируемого фасада

После определения коэффициента теплотехнической однородности рассматриваемой системы навесного вентилируемого фасада можно производить расчет теплотехнических и экономических параметров системы для целевого объекта. В таблице 3.4 представлены теплотехнические параметры конструкции.

Таблица 3.4 – Теплотехнические параметры

Параметр	Ед.изм.	Значение
1	2	3
Требуемое сопротивление теплопередаче, R^{req}	$\text{м}^2 \cdot \text{°К}/\text{Вт}$	2,719
Сопротивление теплопередаче существующей конструкции, R_c	$\text{м}^2 \cdot \text{°К}/\text{Вт}$	0,873
Сопротивление теплопередаче участка конструкции до воздушной прослойки, $R_{\text{ст}}^0$	$\text{м}^2 \cdot \text{°К}/\text{Вт}$	3,270
Коэффициент лучистого теплообмена, a_l		1,806
Температура на входе в прослойку, $t_{\text{вх}}$	$^{\circ}\text{C}$	-0,570
Приближенная температура воздуха в прослойке, $t_{\text{ср}}^*$	$^{\circ}\text{C}$	0,503
Скорость движения воздуха в прослойке, $V_{\text{пр}}$	$\text{м}/\text{с}$	1,845
Эквивалентный диаметр прослойки, d	м	0,120
Коэффициент конвективного теплообмена, a_k		8,755
Предельная температура воздуха в прослойке, t_0	$^{\circ}\text{C}$	-0,516
Сопротивление теплопередаче воздушной прослойки, $R_{\text{пр}}^*$	$\text{м}^2 \cdot \text{°К}/\text{Вт}$	0,162
Коэффициент X_0		1,230
Приближенная температура воздуха в прослойке, $t_{\text{ср}}^{**}$	$^{\circ}\text{C}$	-0,521
Уточненные параметры		
Скорость движения воздуха в прослойке, $V_{\text{пр}}$	$\text{м}/\text{с}$	0,388
Температура поверхности прослойки, $t_{\text{пр}}^{\text{ст}}$	$^{\circ}\text{C}$	0,446
Коэффициент X_0	$^{\circ}\text{C}$	0,259
Средняя температура воздуха в прослойке, $t_{\text{ср}}$	$^{\circ}\text{C}$	-0,517
Разность температур в прослойке, Δt	$^{\circ}\text{C}$	-0,963
Расчетная температура t	$^{\circ}\text{C}$	-0,482

1	2	3
Коэффициент конвективного теплообмена, a_k		2,131
Сопротивление теплопередаче воздушной прослойки, $R_{\text{пр}}$	$\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{К}/\text{Вт}$	0,348
Сопротивление теплопередаче конструкции после утепления, $R_{\text{нф}}^{\text{des}}$	$\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{К}/\text{Вт}$	3,671

При расчете изначально были определены приближенные значения параметров $t_{\text{ср}}$ и $V_{\text{пр}}$, а затем эти значения были уточнены и в дальнейшем уточненные значения были использованы для определения сопротивления теплопередаче воздушной прослойки и конструкции в целом, что важно для дальнейшего определения экономической эффективности системы при реконструкции рассматриваемого здания типовой серии 1-447с.

3.6 Влияние степени однородности системы навесного вентилируемого фасада на эффективность его применения

Как уже было ранее установлено, крепежные элементы навесного вентилируемого фасада оказывают существенное влияние на однородность конструкции в целом, что сказывается на эффективности применения этих систем. Следует выделить следующие факторы, которые определяют влияние крепежных элементов на эффективность систем вентилируемых фасадов:

- материал крепежных элементов;
- геометрические параметры крепежных элементов;
- количество крепежных элементов, приходящихся на 1м^2 конструкции.
- *влияние материала крепежных элементов на однородность конструкции*

В системах навесных вентилируемых фасадов используются как кронштейны, изготовленные из стали, так и кронштейны, изготовленные из алюминия, который имеет большую по сравнению со сталью теплопроводность ($200 \text{ Вт}/\text{м} \cdot ^\circ\text{C}$). Для наглядности отобразим параметры однородности конструкции и экономические параметры эффективности системы навесного вентилируемого

фасада для рассматриваемого в п. 3.5 здания с тем условием, что кронштейн изготовлен из алюминия (таблица 3.5).

Таблица 3.5 – Результаты расчета для кронштейна из алюминия

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

- влияние геометрических параметров и количества на 1 м² крепежных элементов на однородность конструкции

Значительную роль в определении степени однородности конструкции играет концентрация крепежных элементов на 1 м² наружной стены здания. Для того, чтобы исследовать зависимость количества кронштейнов, приходящихся на 1 м² конструкции, воспользуемся ранее разработанной в п.3.5 моделью. С ее помощью найдем коэффициент однородности конструкции для различной концентрации крепежных элементов и различных геометрических параметрах. В таблице 3.6 представлены найденные коэффициенты однородности

Таблица 3.6 – Коэффициенты однородности r

Количество кронштейнов на 1 м ²	Стальной кронштейн		Алюминиевый кронштейн	
	210×40×2 мм с анкерным болтом 120*10 мм	210×60×2 мм с анкерным болтом 120*12 мм	210×40×2 мм с анкерным болтом 120*10 мм	210×60×2 мм с анкерным болтом 120*12 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

Полученные данные наглядно демонстрируют, как изменяется коэффициент однородности конструкции в зависимости от количества кронштейнов с анкерными болтами, приходящихся на 1 м² ограждающей конструкции. Очевидно, что коэффициент однородности конструкции в значительной мере оказывает влияние на сопротивление теплопередаче системы навесного вентилируемого фасада. На примере рассматриваемого в п.3.5 здания типовой серии 1-447 отобразим зависимость сопротивления теплопередаче R_{hf} конструкции после монтажа навесного вентилируемого фасада (рисунок 3.11).

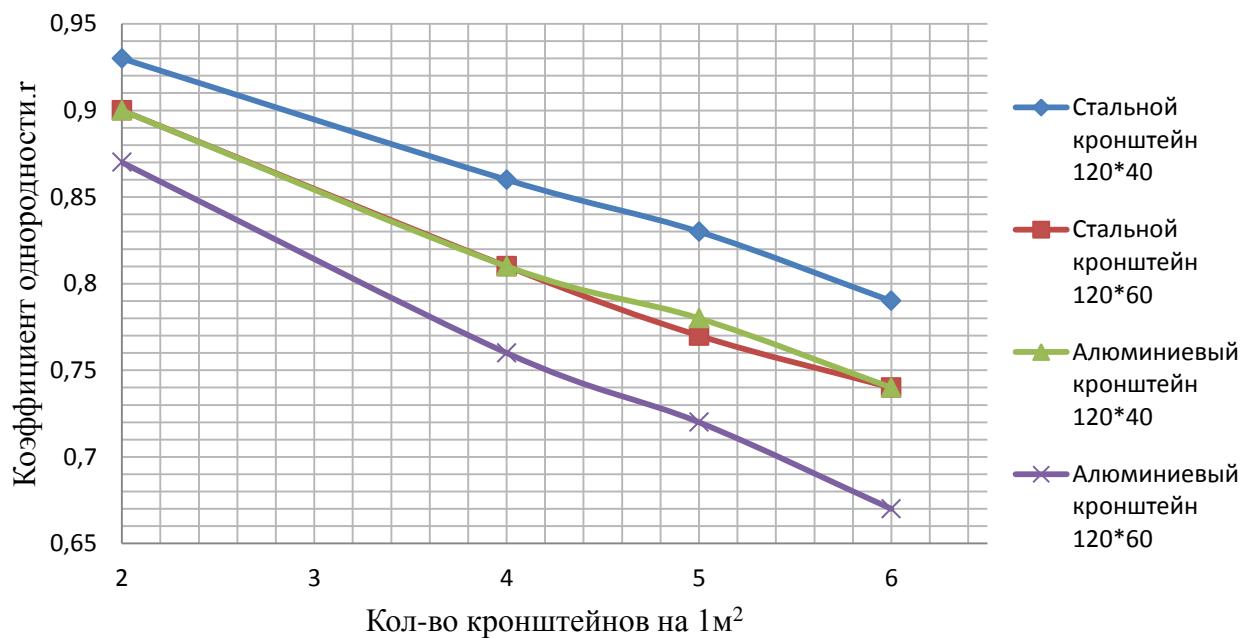


Рисунок 3.11 – Коэффициент однородности r

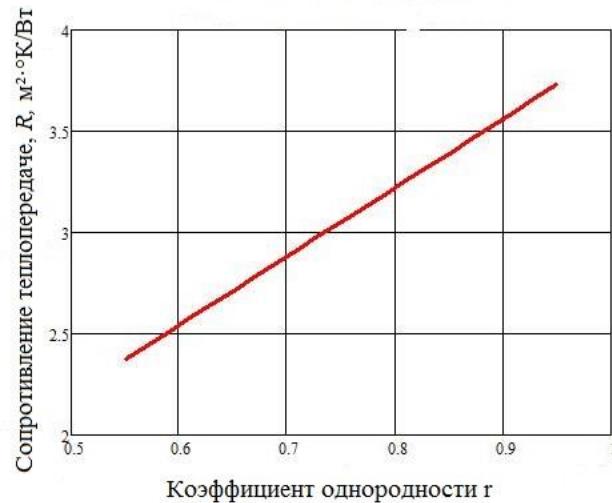


Рисунок 3.12 - Зависимость R_{hf} от r (серия 1-447)

3.7 Влажностный режим навесного фасада с вентилируемой воздушной прослойкой

Наличие воздушной прослойки в системах навесных фасадов играет важную роль во влажностном режиме всей ограждающей конструкции. Благодаря прослойке возможна асимиляция влаги, проходящей через конструкцию. Однако в конструкции возможна конденсация влаги. Как правило, при наличии в конструкции теплоизоляционного слоя плоскость возможной конденсации влаги совпадает с его наружной поверхностью. Т.к. в системах навесных вентилируемых фасадов в качестве теплоизоляционного материала используется минеральная вата, то вопрос о влагонакоплении в конструкции играет особую роль. Это связано с тем, что при увлажнении минеральная вата теряет свои теплоизоляционные свойства, а это, в свою очередь, будет негативно влиять на энергетическую эффективность всей системы. Поэтому вопрос о влагонакоплении в системах навесных фасадов с вентилируемой воздушной прослойкой должен быть рассмотрен достаточно подробно.

3.7.1 Определение расположения плоскости возможной конденсации

Первым шагом является определение параметров внутреннего и наружного воздуха t_{ext} , e_{ext} , E_{int} и Φ_{int} для каждого периода года (раздел 1,2). Следующим этапом является построение графика распределения температур по слоям ограждающей конструкции (теплоизоляционный слой при этом необходимо разбить на четыре участка). Температура по слоям конструкции t_c определяется по формуле

$$t_c = t_{int} - (t_{int} - t_{ext}) \cdot \frac{R_c}{R_0}, \quad (3.20)$$

где R_c - сопротивление теплопередаче конструкции до рассматриваемого слоя, $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$;

R_0 - сопротивление теплопередаче всей конструкции, $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$.

После этого согласно полученным температурам определяется давление насыщенного водяного пара по слоям конструкции согласно выражениям:

- для $t < 0$

$$E = \exp \frac{18,7 \cdot t_c - 115,72}{233,77 + 0,881 \cdot t_c}; \quad (3.21)$$

- для $t \geq 0$

$$E = \exp \frac{16,57 \cdot t_c - 115,72}{233,77 + 0,997 \cdot t_c}. \quad (3.22)$$

После этого строится график, на котором согласно выбранным сечениям откладываются значения E и строится график $e_{ext} - e_{int}$. Построения проводятся для всех периодов года. Для определения плоскости возможной конденсации из концов прямой $e_{ext} - e_{int}$ проводится касательная к графику E . Область между точками касания E_k' и E_k'' - зона конденсации. При совпадении точек E_k' и E_k'' - плоскость конденсации.

С помощью значений E_k' и E_k'' можно определить количество влаги, приходящей зону конденсации P' и уходящей из неё P''

$$P' = \frac{e_{int} - E''_k}{R'_{vp}} \cdot z \cdot 722; \quad (3.23)$$

$$P'' = \frac{E''_k - e_{ext}}{R''_{vp}} \cdot z \cdot 722, \quad (3.24)$$

где R'_{vp} - сопротивление паропроницанию от внутренней поверхности до зоны конденсации, $\text{m}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}/\text{мг}$;

R_{vp}^e - сопротивление паропроницанию от зоны конденсации до наружной поверхности, $\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}/\text{мг}$;

z –длительность периода, мес.

Годовой баланс влаги определяется по формуле

$$P_e = \sum_{i=1}^3 P'_i + \sum_{i=1}^3 P''_i. \quad (3.25)$$

При этом конструкция удовлетворяет строительные нормы, если $P \geq 0$.

Количество конденсата, накопившегося в конструкции за период влагонакопления определяется по формуле

$$P_e = \sum_{i=1}^3 P'_i + \sum_{i=1}^3 P''_i. \quad (3.26)$$

Значения Р при этом берутся только за период влагонакопления.

Допустимое количество влаги, которое может поглотить 1 м^2 увлажняемого слоя определяется по формуле

$$\Delta P = 10^4 \cdot \Delta w_{av} \cdot \rho \cdot \delta, \quad (3.27)$$

где Δw_{av} - предельно допустимое приращение расчетного массового отношения влаги в материале, %.

ρ - плотность материала увлажняемого слоя, $\text{кг}/\text{м}^3$.

3.7.2 Определение сопротивления паропроницанию элементов конструкции с навесным фасадом с вентилируемой воздушной прослойкой

Сопротивление паропроницанию ограждающей конструкции R_{vp} определяется так же, как и в разделах 1,2. Определение сопротивления паропроницанию декоративного слоя навесного фасада имеет свои особенности, связанные с наличием швов-зазоров.

Сопротивление паропроницанию в стыковых швах определяется по формуле

$$R_{vp}^{\partial ek} = \frac{\delta_{\partial ek}}{(\eta_w / \sum \xi)}, \quad (3.28)$$

где $\sum \xi$ - то же, что и в 3.13;

η_w - 6,5 мг/м²·ч·Па;

$\delta_{\partial ek}$ - толщина декоративного слоя, м.

Приведенное сопротивление паропроницанию декоративного слоя определяется по формуле

$$R_{vp}^{\partial ek} = \frac{\sum F}{\frac{F_n}{R_{vp}^n} + \frac{F'}{R_{vp}^{\partial ek}}}, \quad (3.29)$$

где F_n , F' - соответственно, площадь панелей без швов-зазоров и площадь швов-зазоров, м²;

$\sum F$ - суммарная площадь декоративного слоя, м².

С учетом 4.38, выражение 4.39 принимает вид

$$R_{vp}^{\partial ek} = \frac{\sum F}{\frac{F_n \cdot \mu_n}{\delta_{\partial ek}} + \frac{F' \cdot \eta_w}{\delta_{\partial ek} \cdot \sum \xi}}, \quad (3.30)$$

Нормативные значения сопротивления паропроницанию определяются так же, как и в разделах 1,2.

3.7.3 Влагопередача в конструкции с воздушной прослойкой.

Основной задачей воздушной прослойки в системах навесных фасадов является удаление влаги из конструкции, что возможно благодаря способности воздуха, проходящего через прослойку, ассимилировать влагу. Способность единицы массы воздуха в 1кг ассимилировать определенное количество водяного пара (г) определяется выражением [30]

$$\zeta = \frac{8,27 \cdot 10^4}{P - 0,387 \cdot e}, \quad (3.31)$$

где P – полное барометрическое давление, Па;

e – парциальное давление водяного пара, Па.

При $P = 101,1$ кПа величина ζ приблизительно равна 0,835.

Выражение для определения парциального давления водяного пара в произвольном сечении воздушной прослойки определяется выражением [30]

$$\frac{e_x - e_{\text{б.н.}}}{e_0 - e_{\text{б.н.}}} = e^{-A \cdot x}, \quad (3.32)$$

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

$e_{\text{б.н.}}$ – предельное парциальное давление водяного пара в прослойке, Па, которое определяется по формуле

$$e_{\text{б.н.}} = \frac{\frac{e_{\text{int}}}{R_{vp}^{\text{cm}}} + \frac{e_{\text{ext}}}{R_{vp}^{\partial\text{ек}}}}{\frac{1}{R_{vp}^{\text{cm}}} + \frac{1}{R_{vp}^{\partial\text{ек}}}}. \quad (3.33)$$

Параметр A представляет собой выражение:

$$A = \frac{\frac{1}{R_{vp}^{\text{cm}}} + \frac{1}{R_{vp}^{\partial\text{ек}}}}{\zeta \cdot j}, \quad (3.34)$$

где j – расход воздуха в воздушной прослойке, кг/ч, определяемый по формуле:

$$j = V_{np} \cdot 3600 \cdot \delta_{np} \cdot \rho_{np}, \quad (3.35)$$

где ρ_{np} – плотность воздуха в прослойке, кг/м³.

Парциальное давление водяного пара изменяется по длине прослойки и зависит как от внешних факторов, так и от параметров системы фасада. Однако для определения возможной конденсации влаги в ограждающей конструкции и построения графиков распределения парциальных давлений конструкции

необходимо задаться средним значением парциального давления водяного пара в прослойке. Для этого преобразуем выражение 4.42 в более удобную форму

$$e_x = e_{\text{в.н.}} - (e_{\text{в.н.}} - e_0) \cdot e^{-A \cdot x}. \quad (3.36)$$

Далее с помощью интегрирования выражения 4.46 по dx получим выражение для определения среднего значения парциального давления водяного пара по длине прослойки

$$e_{cp} = \frac{1}{L} \cdot \int_0^L (e_{\text{в.н.}} - (e_{\text{в.н.}} - e_0) \cdot e^{-A \cdot x}) dx. \quad (3.37)$$

После интегрирования и математического преобразования получаем выражение для определения среднего значения парциального давления водяного пара в воздушной прослойке

$$e_{cp} = e_{\text{в.н.}} - (e_{\text{в.н.}} - e_0) \cdot \left(\frac{L}{A}\right) \cdot (1 - e^{-A \cdot L}). \quad (3.38)$$

Условие отсутствия конденсации влаги в воздушной прослойке навесного фасада выглядит следующим образом

$$e_L < Et_{\text{в.н.}}, \quad (3.39)$$

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

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

3.7.4 Расчет влажностного режима системы навесного фасада с вентилируемой воздушной прослойкой для зданий типовых серий I-447 и I-464

Панельное здание типовой серии I-464

Детальные характеристики ограждающей конструкции панельного здания типовой серии I-464 представлены в разделе 2. Характеристики ограждающей

конструкции с системой навесного фасада с вентилируемой воздушной прослойкой представлены в таблице 3.13.

Таблица 3.7 – Характеристики системы навесного фасада

Характеристики целевого объекта		
1	2	3
Параметр	Ед.изм.	Значение
Площадь изолируемой поверхности, $A_{ст}$	m^2	2468,97
Толщина наружной стены, δ	м	0,25
Сопротивление теплопередаче наружной стены, R	$m \cdot ^\circ C / Вт$	1,996
Высота здания, H	м	13,5
Климатические характеристики		
Расчётная температура наружного воздуха, t_{ext}	$^\circ C$	-22
Средняя температура воздуха за отопительный период, t_{ext}^{cp}	$^\circ C$	-0,6
Характеристики системы вентилируемого фасада		
Толщина теплоизоляционного слоя, δ_t	м	0,15
Теплопроводность теплоизоляционного слоя, λ_t	$Вт / м \cdot ^\circ K$	0,056
Толщина декоративного слоя, δ_d	м	0,03
Теплопроводность декоративного слоя, λ_d	$Вт / м \cdot ^\circ K$	3,5
Коэффициент теплотехнической однородности, r		0,94
Толщина воздушной прослойки, $\delta_{пр}$	м	0,06
Коэффициент излучения $\xi_{вн1}$		0,45
Коэффициент излучения $\xi_{вн2}$		0,75
Теплотехнические параметры		
Требуемое сопротивление теплопередаче, R^{req}	$m^2 \cdot ^\circ K / Вт$	2,719
Сопротивление теплопередаче существующей конструкции, R_c	$m^2 \cdot ^\circ K / Вт$	1,996

1	2	3
Сопротивление теплопередаче участка конструкции до воздушной прослойки, $R_{ст}^0$	$\text{м}^2 \cdot \text{°К}/\text{Вт}$	4,394
Коэффициент лучистого теплообмена, $a_{л}$		1,806
Температура на входе в прослойку, $t_{вх}$	$^{\circ}\text{C}$	-0,570
Приближенная температура воздуха в прослойке, t_{cp}^*	$^{\circ}\text{C}$	0,503
Скорость движения воздуха в прослойке, $V_{пр}$	$\text{м}/\text{с}$	1,845
Эквивалентный диаметр прослойки, d	м	0,120
Коэффициент конвективного теплообмена, a_k		8,755
Предельная температура воздуха в прослойке, t_0	$^{\circ}\text{C}$	-0,530
Сопротивление теплопередаче воздушной прослойки, $R_{пр}^*$	$\text{м}^2 \cdot \text{°К}/\text{Вт}$	0,162
Коэффициент X_0		1,231
Приближенная температура воздуха в прослойке, t_{cp}^{**}	$^{\circ}\text{C}$	-0,534
<i>Уточненные параметры</i>		
Скорость движения воздуха в прослойке, $V_{пр}$	$\text{м}/\text{с}$	0,335
Температура поверхности прослойки, $t_{пр}^{ст}$	$^{\circ}\text{C}$	0,195
Коэффициент X_0	$^{\circ}\text{C}$	0,224
Средняя температура воздуха в прослойке, t_{cp}	$^{\circ}\text{C}$	-0,531
Разность температур в прослойке, Δt	$^{\circ}\text{C}$	-0,726
Расчетная температура t	$^{\circ}\text{C}$	-0,363
Коэффициент конвективного теплообмена, a_k		2,012
Сопротивление теплопередаче воздушной прослойки, $R_{пр}$	$\text{м}^2 \cdot \text{°К}/\text{Вт}$	0,356
Сопротивление теплопередаче конструкции после утепления, R^{des}	$\text{м}^2 \cdot \text{°К}/\text{Вт}$	4,802

Характеристики элементов конструкции и значения температур представлены в таблицах 3.8 - 3.9.

Таблица 3.8 – Характеристики слоев конструкции

№ п/п слоя	Конструкционная граница	Толщина слоя, м	Теплопроводность, Вт/м·°C	Сопротивление теплопередаче слоя, R, м ² ·°C/Вт	Сопротивление теплопередаче конструкции, R, м ² ·°C/Вт
1	внут.воздух/штука тарка	-	-	0,115	0,115
2	штукатурка/ж.б. плита	0,01	0,76	0,013	0,128
3	ж.б. плита/минвата	0,04	1,7	0,024	0,152
4	минвата	0,04	0,09	0,444	0,596
5	минвата	0,04	0,09	0,444	1,041
6	минвата	0,04	0,09	0,444	1,485
7	минвата/ж.б. плита	0,04	0,09	0,444	1,929
8	ж.б. плита/минвата	0,04	1,7	0,024	1,953
9	минвата	0,0375	0,056	0,670	2,623
10	минвата	0,0375	0,056	0,670	3,292
11	минвата	0,0375	0,056	0,670	3,962
12	минвата/воздушная прослойка	0,0375	0,056	0,670	4,632
13	воздушная прослойка/декорат	0,06		0,340	4,972
14	декоративный слой\нар.воздух	0,03	3,5	0,009	4,980

Таблица 3.9 - Распределение температур по слоям

№ п/п слоя	Temperatura слоя, °C		
	зима	лето	осень/весна
1	19,4	19,9	19,5
2	19,3	19,9	19,5
3	19,2	19,9	19,4
4	16,9	19,6	17,5
5	14,7	19,3	15,6
6	12,4	19,0	13,8
7	10,1	18,7	11,9
8	10,0	18,7	11,8
9	6,6	18,2	9,0
10	3,2	17,8	6,2
11	-0,3	17,3	3,4
12	-3,7	16,9	0,5
13	-5,4	16,6	-0,9
14	-5,5	16,6	-0,9

График распределения температур по слоям конструкции представлен на рисунке 3.13.

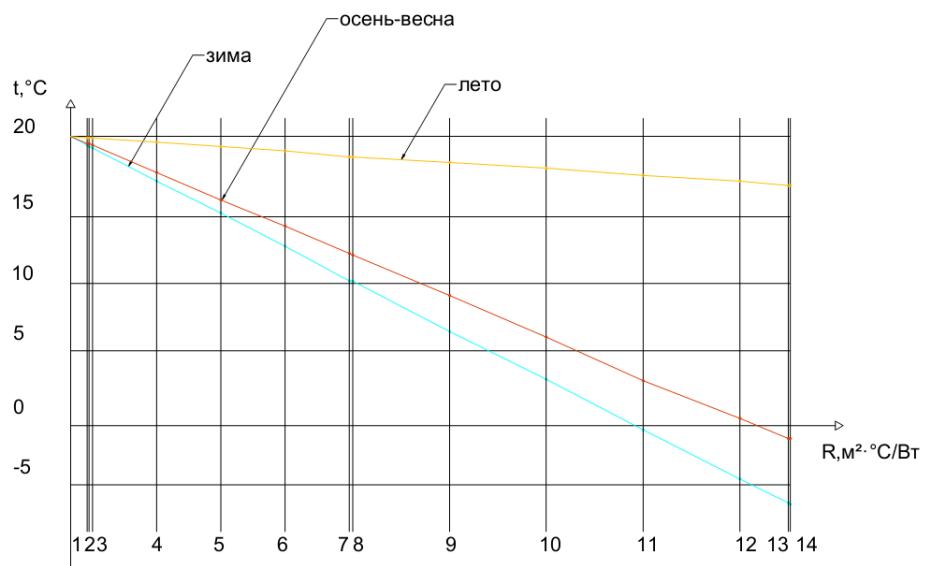


Рисунок 3.13 – Распределение температуры по слоям

Параметры наружного и внутреннего воздуха, необходимы для расчета, представлены в таблице 3.10.

Таблица 3.10 – Параметры воздуха

Параметр	Ед. изм.	Значение
Расчетная температура внутреннего воздуха, t_{int}	°C	20
Парциальное давление водяного пара в помещении, e_{int}	Па	1285,9
Парциальное давление водяного пара зимнего периода, e_{ext1}	Па	321
Парциальное давление водяного пара летнего периода, e_{ext2}	Па	1213
Парциальное давление водяного пара осенне-весеннего периода, e_{ext3}	Па	533
Парциальное давление водяного пара на входе в прослойку для зимнего периода, e_0	Па	337,05
Парциальное давление водяного пара на входе в прослойку для летнего периода, e_0	Па	1273,65
Парциальное давление водяного пара на входе в прослойку для осенне-весеннего периода, e_0	Па	559,65

Значения сопротивлений паропроницанию по слоям конструкции представлены в таблице 3.11.

Таблица 3.11 – Сопротивление паропроницанию элементов конструкции

№ п/п слоя	Конструкционная граница	Толщина слоя, м	Коэффициент паропроницания, $M^2/M \cdot ч \cdot Па$	Сопротивление паропроницанию слоя, $R_{vp} M^2 \cdot ч \cdot Па/M^2$	Сопротивление паропроницанию конструкции, $R M^2 \cdot ч \cdot Па/M^2$
1	2	3	4	5	6
1	внут.воздух/штукатурка	-	-	-	
2	штукатурка/ж.б. плита	0,01	0,09	0,111	0,111
3	ж.б. плита/минвата	0,04	0,03	1,333	1,444

1	2	3	4	5	6
4	минвата	0,04	0,6	0,067	1,511
5	минвата	0,04	0,6	0,067	1,578
6	минвата	0,04	0,6	0,067	1,644
7	минвата/ж.б. плита	0,04	0,6	0,067	1,711
8	ж.б. плита/минвата	0,04	0,03	1,333	3,044
9	минвата	0,0375	0,6	0,063	3,107
10	минвата	0,0375	0,6	0,063	3,169
11	минвата	0,0375	0,6	0,063	3,232
12	минвата/воздушная прослойка	0,0375	0,6	0,063	3,294

Значения парциальных давления по слоям конструкции для периодов года отображены в таблице 3.12.

Таблица 3.12 - Парциальное давление насыщенного водяного пара

№ п/п слоя	Парциальное давление насыщенного водяного пара Е, Па		
	зима	лето	осень-весна
1	2255,9	2328,6	2270,8
2	2246,5	2327,3	2263,0
3	2229,7	2325,0	2249,1
4	1932,5	2282,0	2000,5
5	1670,5	2239,7	1776,2
6	1440,2	2198,0	1574,3
7	1238,2	2157,1	1392,8
8	1228,2	2154,9	1383,7
9	972,7	2094,5	1146,3
10	765,1	2035,6	945,4
11	596,2	1978,1	776,2
12	448,5	1922,1	634,2

Параметры воздуха и водяного пара в воздушной прослойке отображены в таблице 3.13.

Таблица 3.13 – Параметры влагопередачи в прослойке

Параметр	Ед.изм.	Значение		
		зима	лето	весна-осень
Средняя температура воздуха в прослойке, t_{cp}	°C	- 5,4	15,8	- 1,0
Скорость движения воздуха в прослойке, V_{pr}	м/с	0,39	0,164	0,356
Расход воздуха в прослойке, j	кг/с	0,0309	0,0121	0,0277
Предельное парциальное давление водяного пара в прослойке, $e_{v.p.}$	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, $E_{v.p.}$	Па	390	1795,8	561,5

Графики распределения парциального давления по слоям конструкции изображены на рисунках 3.17 – 3.18. На графиках видно, что зона возможной конденсации в зимний период начинается в наружном теплоизоляционном слое на расстоянии 0,03 м от воздушной прослойки, а в осенне-весенний период – на расстоянии 0,015 м от воздушной прослойки. Согласно данным таблицы 3.19, исходя из условия 3.39, можно сделать вывод, что влага, конденсирующаяся в воздушной прослойке на протяжении периода влагонакопления, полностью не испаряется. Таким образом, в такой конструкции происходит постоянное увлажнение теплоизоляционного слоя, что негативно сказывается на его теплотехнических характеристиках.

Также следует отметить, что данный расчет для зданий типовых серий 1-447 и 1-464 проходил без учета теплопроводных включений, которые могут оказать воздействие на процессы влагонакопления в конструкции.

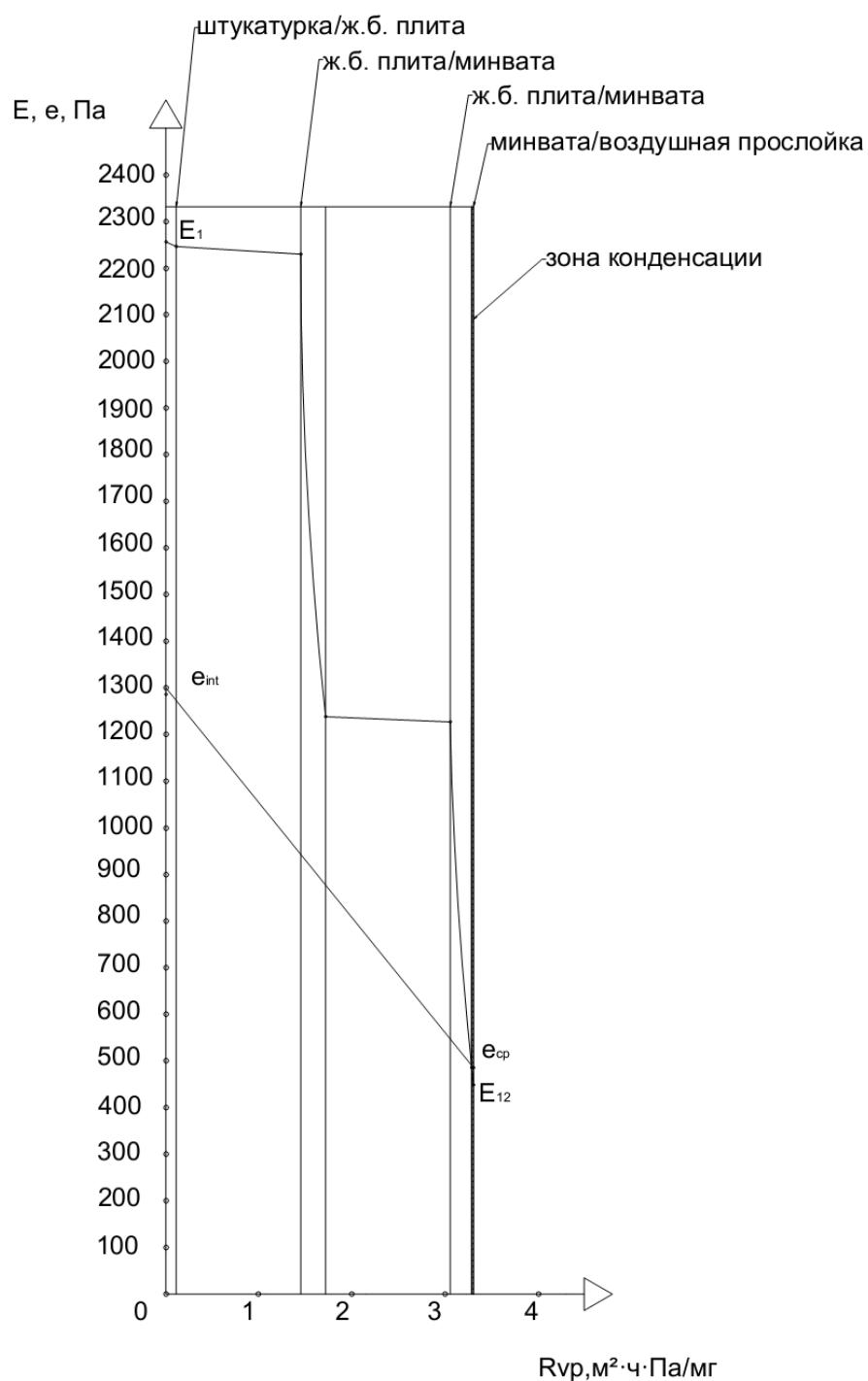


Рисунок 3.14 – Парциальное давление по слоям конструкции (зима)

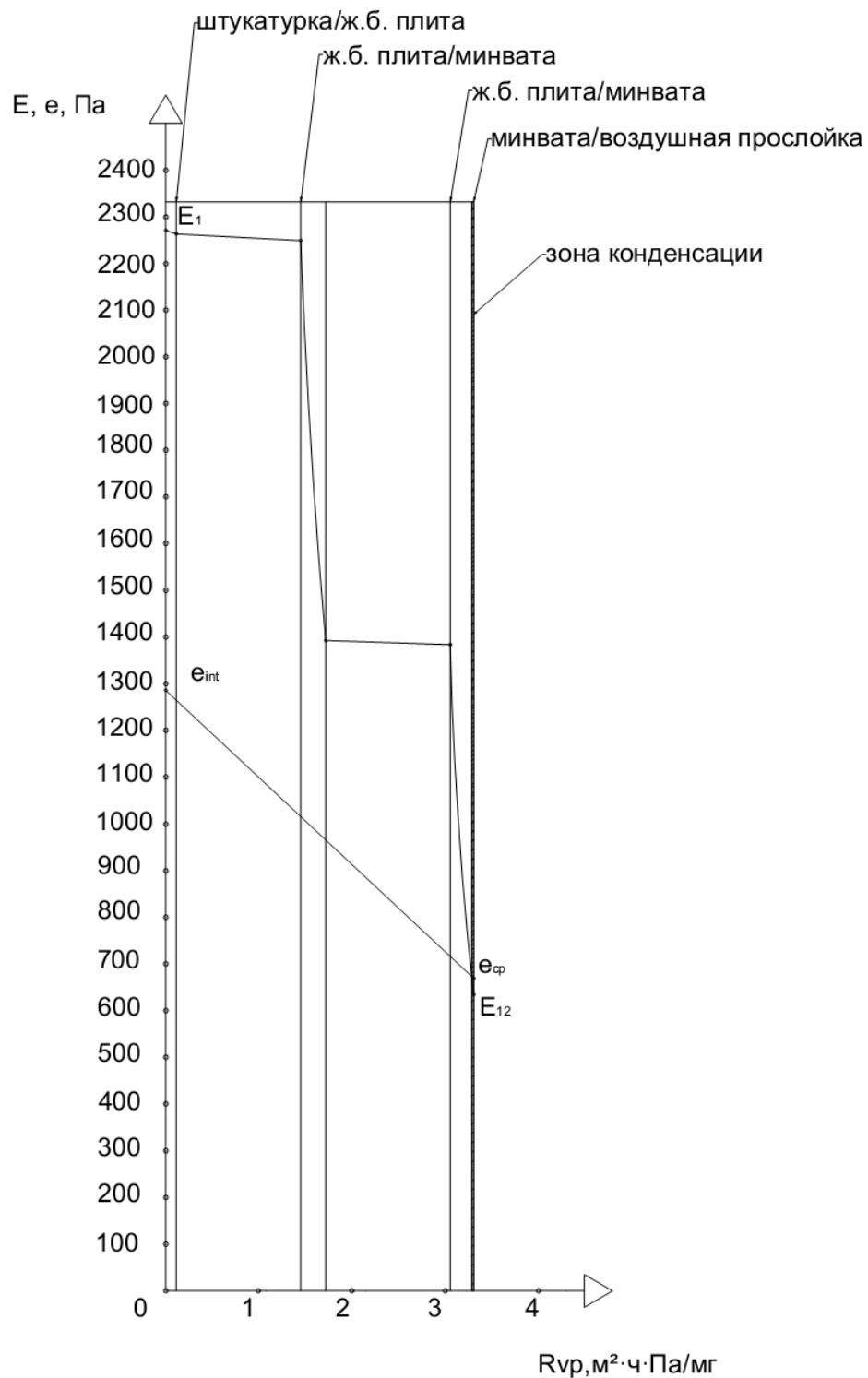


Рисунок 3.15 – Парциальное давление по слоям конструкции (осень-весна).

Исходя из полученных данных можно сделать вывод, что конденсация влаги в ограждающих конструкциях здания типовой серии 1-464 происходит в самом теплоизоляционном слое вблизи наружной поверхности. Накопление влаги

в теплоизоляционном слое способствует ухудшению его теплоизоляционных характеристик.

Расчет параметров паропроницания и конденсации для кирпичного пятиэтажного жилого здания серии I-447 представлен в Приложении Г.

3.8 Определение фактических параметров теплового комфорта в помещении

При проведении расчётов потенциальной температуры внутреннего воздуха в квартире после проведения «точечного» утепления одним из основных параметров является фактическая температура воздуха в квартире. От значения фактической температуры зависит существующая тепловая нагрузка квартиры и тепловые потери. Путем сравнения с фактической температурой мы можем определить эффективность «точечного» утепления. Именно значение фактической температуры воздуха является определяющим фактором при принятии решения о проведении «точечного» утепления.

Однако следует отметить, что при замере фактической температуры воздуха в квартире могут возникнуть некоторые сложности. Т.к. распределение тепла от радиатора в помещении неравномерно, в помещении присутствуют более теплые зоны (над радиатором и вблизи него) и более холодные зоны. Таким образом, возникает необходимость определить такую точку помещения, в которой значение температуры воздуха и коэффициента теплоотдачи от радиатора a_k ближе всего к среднеобъёмному значению. Определив эту точку, мы сможем наиболее достоверно определить фактическую температуру воздуха в помещении и эффективность «точечного» утепления.

Определить точку помещения, в которой значения t_ϕ и a_k ближе всего к среднеобъёмному, определить факторы, которые в наибольшей степени влияют на параметры теплового комфорта в помещении можно определить с помощью многофакторного эксперимента.

Обследуемое помещение – жилая комната квартиры третьего этажа торцевой секции пятиэтажного кирпичного здания типовой серии 1-447. Помещение имеет следующие габаритные размеры:

- высота $h = 2,5$ м;

- длина $l = 5,61$ м;
- ширина $b = 3$ м.

Для замера температуры выбрано 9-ть точек пространства – на высоте 0,5; 1,25 и 2 м от пола и на расстоянии 0,5 м; 2,8 м; 5,1 м от радиатора.

Замеры температур проводились с помощью цифрового мультиметра модели М – 83. Цифровой мультиметр М-83 - это компактный карманный электрический мультиметр, предназначенный для измерения постоянного и переменного напряжения, тока, сопротивления и диода. Данный прибор имеет также датчик температур. Измерения температур может производиться как с помощью термоэлектрического элемента, так и без него.

С помощью мультиметра производились замеры температур в 9-ти точках помещения, а также на поверхности радиатора. Измерения с использованием термоэлектрического элемента дало более точные результаты. Результаты замеров и предварительных расчётов занесены в таблицу 2.12.

В соответствии с международной практической температурной шкалой 1968г. Основной температурой является термодинамическая температура, единица которой – Кельвин (К). Для технологических и практических измерений применяют температурную шкалу с единицей в градусе Цельсия ($^{\circ}\text{C}$). $1^{\circ}\text{C} = 1^{\circ}\text{K}$.

Измерения температур могут проводиться контактными и бесконтактными методами. Для контактных измерений применяют различные виды термометров расширения, термопреобразователи сопротивления и термоэлектрические преобразователи. Бесконтактные измерения производятся с помощью пирометров.

Цифровой мультиметр М-83 (рис. 3.16) имеет встроенный термоэлектрический преобразователь (термопару). Принцип действия термопар основан на свойстве двух разнородных проводников создавать термоэлектродвижущую силу (термо- э.д.с.) при нагревании места их соединения – спая. Проводники в этом случае называют термоэлектродами, а всё устройство – термопарой.

Величина термо-Э.д.с. термопары зависит от материала термоэлектродов и разности температур горячего спая и холодных спаев.

Термопары являются первичными преобразователями в Э.д.с. –сигнал, удобный для дистанционной передачи. Поэтому в измерительную цепь за термопарой может быть сразу включён измерительный прибор.

Проведение эксперимента:

- 1) Измеряем геометрические параметров помещения (длина, ширина, высота) по внутренним стенкам помещения с помощью строительной рулетки;
- 2) Отмеряем три точки, находящиеся на расстоянии 0,5; 2,8; и 5,1 м от радиатора;
- 3) В каждой из полученных точек производятся замеры высот 0,5; 1,25 и 2 м от пола. Таким образом, получаем 9 точек в пространстве для измерения температур (рис. 3.17);
- 4) В первой точке, находящейся на расстоянии 0,5 м от радиатора и 0,5 м от пола, производим 3 измерения температуры с помощью мультиметра М-83. Из полученных трёх значений температур находим среднее арифметическое и заносим его в таблицу измерений как температуру в данной точке;
- 5) Действия из П.4 повторяем для остальных 8-ми точек пространства.



Рисунок 3.16 – Цифровой мультиметр

Источники погрешности при измерении термопарой: неоднородность материала термоэлектродов, старение термоэлектродов, погрешность при преобразовании сигнала, внешние помехи, случайная погрешность. В таблице 3.14 представлены результаты замеров температуры и промежуточные вычисления.

Таблица 3.14– Результаты измерений

№ точки	Высота $h, м$	Расстояние $d, м$	$t_n, ^\circ C$	$t_o, ^\circ C$	$\Delta t, ^\circ C$	$t_{cp} = 0,5 \cdot (t_n + t_o)$
1	0,5	0,5	47	17,5	29,5	32,25
2	1,25	0,5	47	18	29	32,5
3	2	0,5	47	19,5	27,5	33,25
4	0,5	2,8	47	17	30	32
5	1,25	2,8	47	17,5	29,5	32,25
6	2	2,8	47	18,5	28,5	32,75
7	0,5	5,1	47	17	30	32
8	1,25	5,1	47	18	29	32,5
9	2	5,1	47	18	29	32,5

Δt – разность температур на поверхности радиатора и воздуха в помещении

$$\Delta t = t_n - t_o, ^\circ C, \quad (3.40)$$

где t_n – температура на поверхности отопительного прибора, $^\circ C$;

t_o – температура помещения, $^\circ C$;

t_{cp} – средняя температура, $^\circ C$.

$$t_{cp} = 0,5 \cdot (t_n + t_o). \quad (3.41)$$

По средней температуре t_{cp} определяются необходимые параметры воздуха внутри помещения.

Статистическим методом исследования влияния одной или нескольких независимых переменных X_1, X_2, \dots, X_n на зависимую переменную Y является регрессионный анализ, [84,88]. В нашем случае можно определить связь между

температурами поверхности отопительного прибора и воздуха, высотой точки замера и удалением от радиатора и зависимой переменной – средним значением коэффициента конвективной теплоотдачи α_k .

Натуральные величины необходимо заменить на кодированные:

X_1 – разность температур поверхности отопительного прибора и воздуха в помещении;

X_2 – высота помещения;

X_3 – расстояние от радиатора;

Y – коэффициент конвективной теплоотдачи.

$$X_1 = \frac{\Delta t - \Delta t_0}{\Delta X_1}; \quad (3.42)$$

$$X_2 = \frac{h - h_0}{\Delta X_2}; \quad (3.43)$$

$$X_3 = \frac{d - d_0}{\Delta X_3}, \quad (3.44)$$

где $\Delta t_o, h_o, d_o$ – значения переменной на «нулевом» уровне.

$$\Delta t_o = (\Sigma \Delta t)/n; \quad (3.45)$$

$$h_o = (\Sigma h)/n; \quad (3.46)$$

$$d_o = (\Sigma d)/n. \quad (3.47)$$

Интервалы вариации $\Delta X_1, \Delta X_2, \Delta X_3$ определяются по формуле

$$\Delta X_I = (\Delta t_{max} - \Delta t_{min})/2; \quad (3.48)$$

$$\Delta X_2 = (h_{max} - h_{min})/2; \quad (3.49)$$

$$\Delta X_3 = (d_{max} - d_{min})/2. \quad (3.50)$$

Уровни переменных в натуральных и условных масштабах представлены в таблице 3.15.

Таблица 3.15- 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 ус. 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

Выходной параметр Y рассчитывается по формуле, [63]

$$\alpha_k = (Nu \cdot \lambda) / h, \quad (3.51)$$

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

Nu – критерий Нуссельта.

В условиях свободной конвекции при ламинарном режиме для определения критерия Нуссельта используются следующие формулы[63]

$$Nu = 0,347 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,267}, 1,0 \cdot 10^5 \leq Gr \cdot Pr \leq 1,7 \cdot 10^8, \quad (3.52)$$

$$Nu = 0,02 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,416}, Gr \cdot Pr > 1,7 \cdot 10^8. \quad (3.53)$$

Теплофизические параметры воздуха определяются по средней температуре t_{cp} . Использую справочную литературу [32,63], определяем следующие параметры воздуха в помещении: коэффициент кинематической вязкости ν , м²/с; коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·°C) и критерий Прандтля Pr . Критерий Грасгофа для условий свободной конвекции на нагревых поверхностях в ограниченном объёме определяется по формуле [32,63]

$$Gr = (g \cdot \beta \cdot \Delta t \cdot h^3) \cdot \nu^{-2}, \quad (3.54)$$

где β - коэффициент объёмного расширения.

$$\beta = 1/T_{cp}, T_{cp} = t_{cp} + 273,5, K^{-1}. \quad (3.55)$$

Результаты, полученные в результате составления матрицы планирования, позволяют получить регрессионную зависимость между параметрами и тремя переменными факторами.

$$\begin{aligned} y = & b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 \\ & + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3. \end{aligned} \quad (3.56)$$

Для того, чтобы матрица планирования обладала свойствами ортогональности, необходимо ввести столбцы с корректированными значениями уровня X' [84], которые вычисляются по формуле

$$(X'_i)^2 = X_i^2 - \frac{\sum X_i^2}{N}. \quad (3.57)$$

Матрица результаты перемножения факторов эксперимента и парных взаимодействий с выходными параметрами представлены в Приложении Д.

Свободный коэффициент регрессии определяется по формуле

$$b_0 = \frac{\sum Y_u}{N} + (-0,67b_{11}) + (-0,67b_{22}) + (-0,67b_{33}), \quad (3.58)$$

где Y_u —значение выходного параметра в u -м измерении.

Коэффициенты для линейных членов уравнения определяются по формуле

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_{iu} Y_u, \quad (3.59)$$

где X_{iu} — значение i -го фактора в ряде матрицы в u -м измерении.

Квадратичные коэффициенты определяются по формуле

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N (X'_{iu})^2 Y_u. \quad (3.60)$$

Коэффициенты взаимодействий определяются по формуле

$$b_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N \frac{X_{iu} X_{ju} Y_u}{N}. \quad (3.61)$$

В результате расчёта коэффициентов уравнения были получены следующие значения:

$b_1 = 0,053$	$b_{11} = -0,00089$	$b_{12} = 0,00596$
$b_2 = 0,4987$	$b_{22} = -0,0407$	$b_{13} = 0,000037$
$b_3 = 0,00089$	$b_{33} = -0,000037$	$b_{23} = 0,000185$
$b_0 = 4,5039$		

После проведения расчётов было получено уравнение регрессии

$$y = 4,5039 + 0,053 \cdot x_1 + 0,4987 \cdot x_2 + 0,00089 \cdot x_3 - 0,00089 \cdot x_1^2 - 0,0407 \cdot x_2^2 - \\ - 0,000037 \cdot x_3^2 + 0,00596 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,000037 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,000185 \cdot x_2 \cdot x_3 \quad (3.62)$$

Необходимо перейти от кодовых значений переменных к натуральным физическим величинам. После этого получаем уравнение регрессии в натуральном виде

$$a_k = 4,5039 + 0,053 \cdot \Delta t + 0,4987 \cdot h + 0,00089 \cdot d - 0,00089 \cdot \Delta t^2 - 0,0407 \cdot h^2 - \\ - 0,000037 \cdot d^2 + 0,00596 \cdot \Delta t \cdot h + 0,000037 \cdot \Delta t \cdot d + 0,000185 \cdot h \cdot d \quad (3.63)$$

Получив уравнение регрессии в натуральном виде, можно определить факторы, которые оказывают наибольшее влияние на значение коэффициента теплоотдачи a_k . Проанализировав полученные значения a_k , можно сделать вывод,

что наибольшее влияние имеет такое значение, как высота точки замера температуры. Значения коэффициента теплоотдачи a_k в различных точках замера представлены в таблице 3.16

Таблица 3.16 - Значение a_k в точках замеров

№ точки	Высота $h, м$	Расстояние $d, м$	$t_n, ^\circ C$	$t_o, ^\circ C$	$\Delta t, ^\circ C$	$t_{cp} =$ $0,5(t_n+t_o)$	a_k
1	0,5	0,5	47	17,5	29,5	32,25	3,692
2	1,25	0,5	47	18	29	32,5	4,599
3	2	0,5	47	19,5	27,5	33,25	5,047
4	0,5	2,8	47	17	30	32	3,721
5	1,25	2,8	47	17,5	29,5	32,25	4,631
6	2	2,8	47	18,5	28,5	32,75	5,126
7	0,5	5,1	47	17	30	32	3,721
8	1,25	5,1	47	18	29	32,5	4,599
9	2	5,1	47	18	29	32,5	5,167

Значение коэффициента конвективной теплоотдачи увеличивается с ростом высоты помещения h и с ростом значения температуры t_o в точке замера. Наиболее достоверное значение теплоотдачи отопительного прибора можно получить в точке, находящейся на удалении 5,1 м от радиатора и на высоте 1,25 м, т.к. именно в этой точке значение разности температур Δt ближе всего к среднеобъёмному значению.

Полученное уравнение действительно в диапазоне среднеобъёмных температур от 27,5 °C до 30 °C и подходит для определения параметров теплового комфорта в помещении обследуемого здания.

Проверка адекватности математической модели проверялась по критерию Фишера

$$F_p = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2}; \quad (3.64)$$

$$S_{ad}^2 = \frac{\sum_{j=1}^N (y_{jc} - y'_{j})}{N - (k + 1)}, \quad (3.65)$$

где S_{ad}^2 - дисперсия адекватности:

S_y^2 - дисперсия воспроизводимости

$$S_y^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{\sum_{u=1}^n (y_{jc} - y_f)^2}{(n-1)}, \quad (3.66)$$

где y_{jc} - среднее арифметической значение y_f для n параллельных экспериментов;
 y_f - произвольное значение параметра оптимизации;
 y'_f - значение параметра оптимизации, вычисленное по модели;
 N - количество проведенных опытов;
 k - количество факторов.

Полученные значения параметров для проверки адекватности модели представлены в таблице 3.17.

Таблица 3.17 – Проверка адекватности модели

Параметр	N	k	n	S_y^2	S_{ad}^2	F_p
Значение	27	3	3	0,00764	0,0829	10,857

Табличное значение критерия Фишера (при числе степеней свободы 24 для большой дисперсии и 2 для малой дисперсии) для 5-% уровня значимости равно $F_{tab} = 19,4$.

$F_p < F_{tab}$, следовательно, модель адекватна для принятого числа значимости и чисел степеней свобод.

Определение доверительного интервала. Т.к. объем выборки велик ($N=27$), то доверительный интервал определяется по формуле:

$$\bar{x} - t_y \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \leq a \leq \bar{x} + t_y \cdot \frac{s}{\sqrt{n}}, \quad (3.67)$$

где \bar{x} - выборочное среднее значение;

t_y - квантиль распределения Стьюдента (при уровне значимости 0,01 и количестве опытов $N = 6$, принимаем равным 3,707);

a - среднее значение генсовокупности;

s - выборочное среднеквадратичное отклонение;

n - число элементов выборки.

Таблица 3.18 – Расчет доверительного интервала для разности температур отопительного прибора и воздуха в помещении

Параметр	\bar{x}	s^2	s	N	t_y
Значение	30,25	0,083333	0,288675	6	3,707

Доверительный интервал имеет вид - $\bar{x} \pm 0,44$.

3.9 Выводы по разделу

Сформирована методика определения сопротивления теплопередаче конструкции с навесным вентилируемым фасадом.

Построена модель участка конструкции с крепежным элементом навесного вентилируемого фасада и определена его теплотехническая однородность. На примере жилого здания типовой серии 1-447 рассчитаны теплотехнические и экономические параметры навесного фасада с вентилируемой воздушной прослойкой. Определено значение коэффициента теплотехнической однородности для рассматриваемой системы – 0,93. Определено значение сопротивления теплопередаче конструкции с учетом теплопроводных включений и наличия воздушной прослойки - 3,671 $m^2 \cdot ^\circ K / Bt$. Исследовано влияние геометрических параметров и количества крепежных элементов конструкции на степень ее теплотехнической однородности. Определены значения

коэффициентов теплотехнической однородности для стальных и алюминиевых кронштейнов при различной концентрации на 1м² конструкции.

Сформирована методика оценки процессов влагопередачи в конструкции с навесным вентилируемым фасадом и определения расположения плоскости возможной конденсации влаги. Получено выражение для определения среднего значения парциального давления водяного пара в воздушной прослойке.

На примере жилых зданий типовых серий 1-447 и 1-464 определено расположение плоскости возможной конденсации влаги (наружная поверхность теплоизоляционного материала) и значения среднего и предельного парциального давления водяного пара в прослойке – соответственно, 486,19 и 534,4 Па для типовой серии 1-464, а также 433,81 и 475,8 Па для типовой серии 1-447.

Получено уравнение регрессии, с помощью которого можно определить значения коэффициента конвективной теплоотдачи поверхности отопительного прибора, а также точку помещения, в которой температура воздуха ближе всего к среднеобъемному значению – [5,1; 1,25]. Путем сопоставления значений существующей температуры в помещении и расчетной температуры после проведения «точечного» утепления можно наиболее точно определить эффективность метода.

4. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТАХ МОДЕРНИЗАЦИИ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

Наилучшие теплотехнические характеристики теплоизоляционного материала не гарантируют эффективности проекта, т.к. неоправданно высокая цена проекта может свести к минимуму экономический эффект от мероприятия и повысить срок его окупаемости. Поэтому действительно эффективным энергосберегающим проектом будет тот, в котором соотношение экономических, теплотехнических и физических показателей формируют наиболее приемлемую картину инвестиционного проекта.

Для рассмотренных в разделах 2-3 вариантов термомодернизации ограждающих конструкций зданий были определены параметры экономической эффективности, а также определена степень влияния теплотехнических характеристик теплоизоляционных материалов на эти параметры.

Для случая, когда инвестиционным проектом является усовершенствование тепловой изоляции ограждающих конструкций, а экономический эффект определяется экономией тепловой энергии, выражения для определения критериев экономической эффективности принимаю вид

$$\chi_{ДД} = \left(\frac{\delta_m \times (t_{int} - t_{ext}^{cp}) \times A_{cm} \times z \times c_{m.e.}}{4,19 \times 10^9 \times \lambda_m \times R_{\partial o}^{des} \times (R_{\partial o}^{des} + \frac{\delta_m}{\lambda_m})} \right) \times \frac{1 - (\frac{1}{1 + E_p})^{T_{ca}}}{1 - (\frac{1}{1 + E_p})} - A_{cm} \cdot (\delta_m \cdot c_{m.m.} + c_m); \quad (4.1)$$

$$ИД = \frac{\delta_m \times (t_{int} - t_{ext}^{cp}) \times z \times c_{m.e.} \times (1 - (\frac{1}{1 + E_p})^{T_{ca}})}{4,19 \times 10^9 \times \lambda_m \times R_{\partial o}^{des} \times (R_{\partial o}^{des} + \frac{\delta_m}{\lambda_m}) \times (\delta_m \times c_{m.m.} + c_m) \times (1 - (\frac{1}{1 + E_p}))}; \quad (4.2)$$

$$T_{OK} = \frac{\ln(1 - \frac{4,19 \times 10^9 \times \lambda_m \times R_{\partial o}^{des} \times (R_{\partial o}^{des} + \frac{\delta_m}{\lambda_m}) \times (\delta_m \times c_{m.m.} + c_m) \cdot (1 - (\frac{1}{1+E_p}))}{\delta_m \times (t_{int} - t_{ext}^{cp}) \times z \times c_{m.z.}})}{\ln(\frac{1}{1+E_p})}, \quad (4.3)$$

где A_{cm} - площадь утепляемых ограждающих конструкций, м²;

z - продолжительность отопительного периода, с;

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

λ_m – теплопроводность теплоизоляционного слоя, Вт/м·К;

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

δ_m - толщина теплоизоляционного материала, м;

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

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

Таким образом, выражения 4.1 - 4.3 представляют собой итоговые расчётные формулы для определения экономических критериев применения теплоизоляционных материалов при утеплении ограждающих конструкций зданий.

4.1 Определение эффективной толщины теплоизоляционного слоя при непосредственном монтаже на наружную поверхность ограждающей конструкции

В разделе 2 для здания типовой серии 1-447 был определен оптимальный диапазон толщины теплоизоляционного материала при утеплении пенополистиролом ПБС-С. Для нахождения максимально эффективной толщины теплоизоляционного слоя необходимо:

- исследовать зависимости ЧДД от толщины теплоизоляционного слоя на промежутке $\delta_t \in [0,063; 0,2], \text{м}$.

Для этого сначала построим график функции $f(\delta)$ на полученном интервале.



Рисунок 4.1 - Зависимость ЧДД от толщины теплоизоляционного слоя

Детально проанализировав функцию $f(\delta_t)$ с использованием программного комплекса Mathcad установлено, что на допустимом промежутке $\delta_t \in [0,063;0,2]$ ЧДД принимает положительные значения на всем интервале, принимая максимальное значение при $\delta_t = 0,2$ м;

- исследовать зависимость ИД от толщины теплоизоляционного слоя в интервале $\delta_t^{^{\exists\Phi}} \in [0,063;0,2]$:



Рисунок 4.2 - Зависимость ИД от толщины теплоизоляционного слоя

Анализируя зависимость ИД от толщины теплоизоляционного слоя установлено, что на всем эффективном диапазоне $\delta_t^{^{\exists\Phi}} \in [0,063;0,2]$ ИД > 1 , что является условием эффективности мероприятия. Максимальное значение ИД принимает при $\delta_t^{^{\exists\Phi}} = 0,07$ м;

- исследовать зависимость T_{ok} от толщины теплоизоляционного слоя в интервале $\delta_t^{^{\exists\Phi}} \in [0,063;0,2]$.

Построим график зависимости $T_{ок}$ от толщины теплоизоляционного слоя.



Рисунок 4.3 - Зависимость дисконтированного срока окупаемости от толщины теплоизоляционного слоя

Анализируя график зависимости $T_{ок}$ толщины теплоизоляционного слоя и полученные с помощью Mathcad расчётные данные можно сделать вывод, что для текущего расчёта наименьшее значение срока окупаемости наблюдается при толщине теплоизоляционного слоя $0.07 \text{ м} \approx 2.63 \text{ лет}$.

4.2 Навесной фасад с вентилируемой воздушной прослойкой

Выражение для нахождения экономических параметров эффективности для навесных фасадов с вентилируемой воздушной прослойкой имеют вид

$$\eta_{ДД} = \frac{\left((R_{cm} + \frac{\delta_{ym}}{\lambda_{ym}}) \cdot r + R_{np} + R_o - R_{cm} \right) \cdot (t_{int} - t_{ext}^{cp}) \times A_{cm} \times z_{ht} \cdot c_{m..} \cdot \left(1 - \left(\frac{1}{1+E_p} \right)^{T_{ca}} \right)}{4.19 \cdot 10^9 \cdot R_{do}^{des} \cdot \left(\frac{1}{a_{int}} + (R_{cm} + \frac{\delta_{ym}}{\lambda_{ym}}) \cdot r + R_{np} + R_o + \frac{1}{a_{ext}} \right)} \times \frac{A_{cm} \cdot (\delta_m \cdot c_{m..} + c_m)}{\left(1 - \left(\frac{1}{1+E_p} \right) \right)}, \quad (4.4)$$

$$\eta_{Д} = \frac{\left((R_{cm} + \frac{\delta_{ym}}{\lambda_{ym}}) \cdot r + R_{np} + R_o - R_{cm} \right) \cdot (t_{int} - t_{ext}^{cp}) \cdot z_{ht} \cdot c_{m..} \cdot \left(1 - \left(\frac{1}{1+E_p} \right)^{T_{ca}} \right)}{4.19 \cdot 10^9 \cdot R_{do}^{des} \cdot \left(\frac{1}{a_{int}} + (R_{cm} + \frac{\delta_{ym}}{\lambda_{ym}}) \cdot r + R_{np} + R_o + \frac{1}{a_{ext}} \right) \cdot (\delta_m \cdot c_{m..} + c_m) \cdot \left(1 - \left(\frac{1}{1+E_p} \right) \right)}; \quad (4.5)$$

$$T_{ок} = \frac{\ln \left(\frac{1}{1+E_p} \right)}{\ln \left(1 - \frac{\left((R_{cm} + \frac{\delta_{ym}}{\lambda_{ym}}) \cdot r + R_{np} + R_o - R_{cm} \right) \cdot (t_{int} - t_{ext}^{cp}) \cdot z_{ht} \cdot c_{m..}}{\left(4.19 \cdot 10^9 \cdot R_{do}^{des} \cdot \left(\frac{1}{a_{int}} + (R_{cm} + \frac{\delta_{ym}}{\lambda_{ym}}) \cdot r + R_{np} + R_o + \frac{1}{a_{ext}} \right) \cdot (\delta_m \cdot c_{m..} + c_m) \cdot \left(1 - \left(\frac{1}{1+E_p} \right) \right)} \right)} \right)}. \quad (4.6)$$

Параметры экономической эффективности рассматриваемой в разделе 3 системы на примере кирпичного жилого здания типовой серии 1-447 представлены в таблице 4.1. Следует отметить более высокую стоимость монтажа системы навесного вентилируемого фасада по сравнению с технологией «мокрого фасада». Однако важно понимать, что технология навесной вентилируемый фасад способствует сохранению свойств теплоизоляционного материала в течении длительного времени, соответственно, к более длительному сроку использования, что немаловажно для такого теплоизоляционного материала, как минеральная вата, которая в значительной мере подвержена воздействию влаги.

Таблица 4.1 – Параметры экономической эффективности

Параметр	Ед. изм.	Значение
Реальная ставка дисконтирования, Ер	год ⁻¹	0,038
Коэффициент дисконтирования (за период эксплуатации)	год ⁻¹	18,45
Капитальные затраты, К	руб	3049177,95
Экономический эффект, Э	руб	257148,50
Чистый дисконтированный доход, ЧДД	руб	1694785,78
Индекс доходности, ИД		1,56
Дисконтированный срок окупаемости, Т _{ок}	лет	15,2

Таким образом, полученные экономические параметры отображают эффективность системы навесного вентилируемого фасада для рассматриваемого здания типовой серии 1-447с. Срок службы, который был заложен при расчете дисконтированных параметров – 30 лет – соответствует ожидаемому року эксплуатации самих зданий типовой серии, а не сроку эксплуатации системы вентилируемого фасада. Что немаловажно, т.к. для более современных зданий эффективность применения будет выше.

4.3 Влияние степени однородности системы навесного вентилируемого фасада на эффективность его применения

Как уже было ранее установлено, крепежные элементы навесного вентилируемого фасада оказывают существенное влияние на однородность конструкции в целом, что сказывается на эффективности применения этих систем.

Следует выделить следующие факторы, которые определяют влияние крепежных элементов на эффективность систем вентилируемых фасадов:

- материал крепежных элементов;
- геометрические параметры крепежных элементов;
- количество крепежных элементов, приходящихся на 1м² конструкции.

В системах навесных вентилируемых фасадов используются как кронштейны, изготовленные из стали, так и кронштейны, изготовленные из алюминия, который имеет большую по сравнению со сталью теплопроводность (200 Вт/м·°C). Для наглядности отобразим параметры однородности конструкции и экономические параметры эффективности системы навесного вентилируемого фасада для рассматриваемого здания с тем условием, что кронштейн изготовлен из алюминия (таблица 4.2 и 4.3).

Таблица 4.2 – Результаты расчета для кронштейна из алюминия

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

Таблица 4.3 – Параметры экономической эффективности

Параметр	Ед. изм.	Значение
Реальная ставка дисконтирования, E_p	год ⁻¹	0,038
Коэффициент дисконтирования (за период эксплуатации)	год ⁻¹	18,45
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, $T_{\text{ок}}$	лет	15,4

Применение алюминиевых кронштейнов привело к снижению ЧДД на 42541,9 руб (2,5 %) и повышению срока окупаемости мероприятия на 1,3 %.

На примере рассматриваемой системы отобразим влияние коэффициента однородности конструкции на экономические параметры эффективности системы навесного вентилируемого фасада: ЧДД, ИД и СО. На рисунках 4.4-4.6

изображены зависимости вышеуказанных параметров от r для зданий типовой серии 1-447с и при ранее установленных расчетных параметрах.

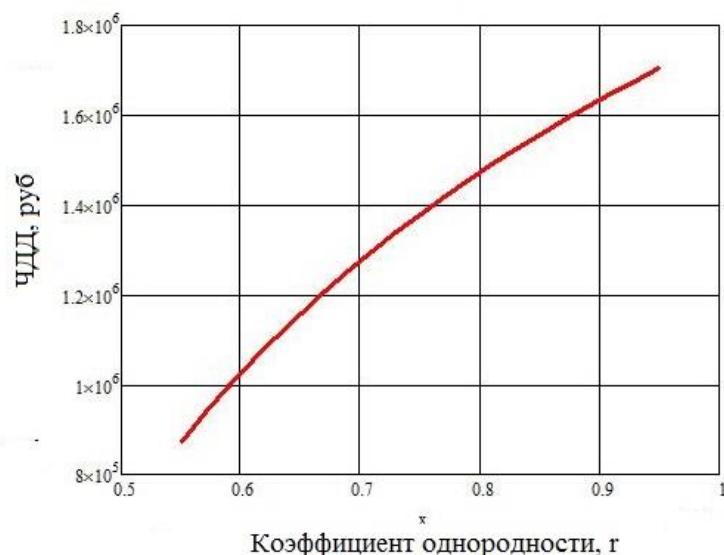


Рисунок 4.4 – Чистый дисконтированный доход

Как видно из графика, при уменьшении коэффициента теплотехнической однородности фасада снижается величина чистого дисконтированного дохода, т.е. снижается экономическая эффективность системы.

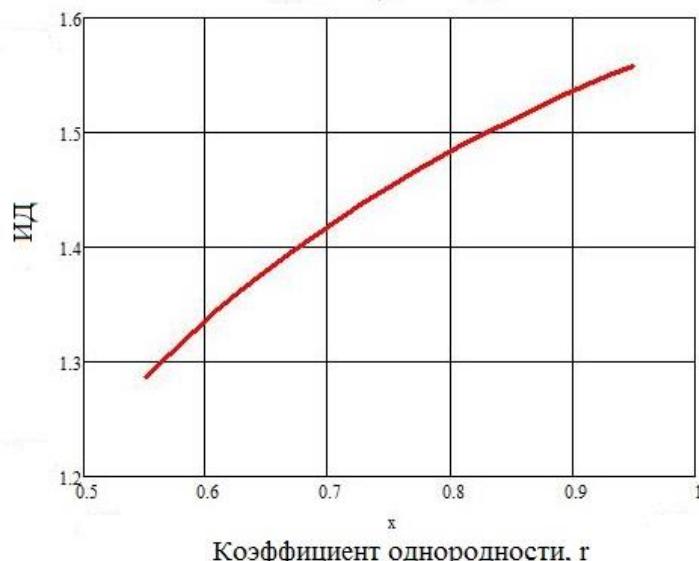


Рисунок 4.5 – Индекс доходности

Аналогичная ситуация имеет место и для значений индекса доходности (рис. 4.5) и срока окупаемости (рис. 4.6).

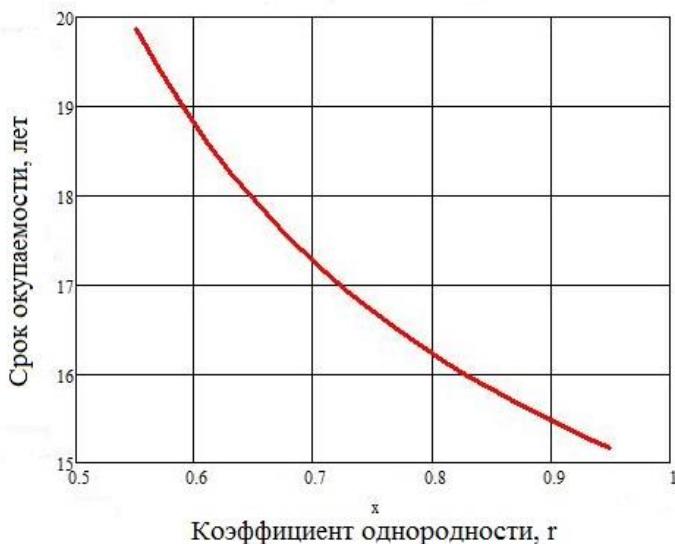


Рисунок 4.6 – Срок окупаемости

Как видно из графиков, степень однородности системы вентилируемого навесного фасада, которая зависит от типа и удельного количества крепежных элементов конструкции, оказывает существенно влияние на экономическую эффективность использования конструкции - повышение концентрации крепежных элементов на 1 m^2 конструкции может привести к снижению экономических показателей на 25 %.

4.4 Выводы по разделу

Получено значение эффективной толщины теплоизоляционного слоя для здания типовой серии 1-447 при утеплении пенополистиролом ПСБ-С – 0,07 м.

Получены значения экономических параметров эффективности для навесного вентилируемого фасада:

- чистый дисконтированный доход - 1694785,78 руб;
- индекс доходности - 1,56;
- дисконтированный срок окупаемости – 15,2 лет.

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 %.

ВЫВОДЫ

В работе обоснована необходимость анализа эффективности теплоизоляционных материалов при проведении мероприятий по модернизации ограждающих конструкций зданий для трех вариантов применения теплоизоляционных материалов:

- изоляция без воздушной прослойки (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.

На примере жилого здания типовой серии 1-464 были рассчитаны параметры эффективности для четырех различных теплоизоляционных материалов. Проанализирована экономическая эффективность термомодернизации с использованием этих материалов.

Получены выражения для определения эффективной толщины теплоизоляционного слоя. Получено значение допустимого диапазона толщины теплоизоляционного материала при реконструкции кирпичного здания типовой серии 1-447.

Получены выражения для определения потенциальной температуры воздуха в помещении при проведении «точечного» утепления.

На примере жилых зданий типовых серий 1-464 и 1-447 проведен анализ эффективности «точечного» утепления для трех различных вариантов расположения квартир.

Установлены зависимости эффективности «точечного» утепления от толщины теплоизоляционного слоя и от доли потерь через наружные стены в общих тепловых потерях квартиры.

Сформирована методика определения эффективности навесных фасадов с вентилируемой воздушной прослойкой с учетом теплопроводных включений. При этом разработана модель участка конструкции с крепежным элементом навесного вентилируемого фасада и определена его теплотехническая однородность. На примере жилого здания типовой серии 1-447 рассчитаны теплотехнические и экономические параметры навесного фасада с вентилируемой воздушной прослойкой. Исследовано влияние геометрических параметров и количества крепежных элементов конструкции на степень ее теплотехнической однородности. Определены значения коэффициентов теплотехнической однородности для стальных и алюминиевых кронштейнов при различной концентрации на 1м^2 конструкции.

Сформирована методика оценки процессов влагопередачи в конструкции с навесным вентилируемым фасадом и определения расположения плоскости возможной конденсации влаги. Получено выражение для определения среднего значения парциального давления водяного пара в воздушной прослойке.

Получено уравнение регрессии, определяющее зависимость коэффициента конвективной теплоотдачи поверхности отопительного прибора от трех переменных факторов. Определена точка замера, в которой значение температуры воздуха в помещении ближе всего к среднеобъемному значению.

Исследовано влияние крепежных элементов навесных вентилируемых фасадов на экономическую эффективность термомодернизации.

Список источников

1. Alin V. Rosca, Ioan Pop. Flow and heat transfer over a vertical permeable stretching/shrinking sheet with a second order slip [Текст]/ Rosca A.V., Pop. I. // Original Research Article. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2013. Vol. 60. Pp. 355–364.
2. Alvaro de Gracia, Luisa F. Cabeza. Phase change materials and thermal energy storage for buildings. [Текст]/ De Gracia A., Cabeza L.F. // Energy and Buildings. 2015. Pp.414-419
3. Anna Laura Pisello, Michael Bobker, Franco Cotana. A Building Energy Efficiency Optimization Method by Evaluating the Effective Thermal Zones Occupancy[Текст] / Pizello A.L., Bobker M., Cotana F.//Energies 2012, 5, 5257-5278
4. Ciampi M., Leccese F., Tuoni G. On the thermal behavior of ventilated facades and roofs [Текст]/ Ciampi M., Leccese F., Tuoni G. // La Termotecnica. 2002. No. 1. Pp. 87–97.
5. Ciampi M., Leccese F., Tuoni G. Some thermal parameters influence on the energy performance of the ventilated walls [Текст]/ Ciampi M., Leccese F., Tuoni G. // Proceedings of 20th UIT National Heat Transfer Conference, 2002, Maratea, Italy. Pp. 357–362.
6. Dagnall M., Window A., Leung A., Thompson D. Analytical assessment of thermal performance of a ventilated glazed facade system [Текст]/ Dagnall M., Window A., Leung A., Thompson D. // Proceedings of Building Simulation: 12th Conference of International Building Performance Simulation Association, Sydney, 2011, 14–16 November. Pp. 808–815.
7. Dagnall M., Window A., Leung A., Thompson D. Analytical assessment of thermal performance of a ventilated glazed facade system [Текст] / Dagnall M., Window A., Leung A., Thompson D. // Proceedings of Building Simulation: 12th Conference of International Building Performance Simulation Association, Sydney, 2011, 14–16 November. Pp. 808–815.

8. De Gracia A, Navarro L, Castell A, Ruiz-Pardo A, A'lvarez S, Cabeza LF. Thermal analysis of a ventilated facade with PCM for cooling applications [Текст] / De Gracia A, Navarro L, Castell A, Ruiz-Pardo A, A'lvarez S, Cabeza LF. // Energy Build. 2013, 65. Pp. 508-515
9. Domínguez, S., Sendra, J.J., León, A.L. Towards energy demand reduction in social housing [Текст] / Domínguez, S., Sendra, J.J., León, A.L. // Energies 2012, 5, Pp. 2263–2287.
10. Jae-Ki Byun , Young-Don Choi , Jong-Keun Shin , Myung-Ho Park, Dong-Kurl Kwak. Study on the Development of an Optimal Heat Supply Control Algorithm for Group Energy Apartment Buildings According to the Variation of Outdoor Air Temperature [Текст] / Jae-Ki Byun , Young-Don Choi , Jong-Keun Shin , Myung-Ho Park, Dong-Kurl Kwak // Energies 2012, 5, Pp. 1686-1704
11. Kuang-Sheng Liu, Sung-Lin Hsueh, Wen-Chen Wu, Yu-Lung Chen. A DFuzzy-DAHP Decision-Making Model for Evaluating Energy-Saving Design Strategies for Residential Buildings [Текст] / Kuang-Sheng Liu, Sung-Lin Hsueh, Wen-Chen Wu, Yu-Lung Chen // Energies 2012, 5, Pp. 4462-4480
12. Lai, C.-M.; Wang, Y.-H. Energy-saving potential of building envelope designs in residential houses in Taiwan [Текст] / Lai, C.-M.; Wang, Y.-H. // Energies 2011, 4, Pp. 2061–2076.
13. Luis Ma. Bo-ot, Yao-Hong Wang, Che-Ming Chiang, Chi-Ming Lai. Effects of a Green Space Layout on the Outdoor Thermal Environment at the Neighborhood Level [Текст] / Luis Ma. Bo-ot, Yao-Hong Wang, Che-Ming Chiang, Chi-Ming Lai // Energies 2012, 5, Pp. 3723-3735
14. Miimu Airaksinen, Mika Vuolle. Heating Energy and Peak-Power Demand in a Standard and Low Energy Building [Текст] / Miimu Airaksinen, Mika Vuolle // Energies 2013, 6, Pp. 235-250
15. Naylor D. A., Floryan J. D., Tarasuk J. D. Numerical study of Developing Free convection Between Isothermal vertical plates [Текст] / Naylor D. A., Floryan J. D., Tarasuk J. D. // Journal of Heat Transfer. 1991. Vol. 113. Pp. 620-626.

16. Pacheco R., Ordóñez J., Martínez G. Energy efficient design of building: A review. Renew. Sustain. [Текст] / Pacheco R., Ordóñez J., Martínez G. // Energy Rev. 2012, 16, Pp. 3559–3573.
17. Popescu D., Bienert S., Schützenhofer C., Boazu. R. Impact of energy efficiency measures on the economic value of buildings. Appl. [Текст] / Popescu D., Bienert S., Schützenhofer C., Boazu. R// Energy 2012, 89, Pp. 454–463.
18. Shameri M.A., Alghoul M.A., Sopian K., Zain M.F.M., Elayeb O. Perspectives of double skin façade systems in buildings and energy saving. Renew. Sustain. [Текст] / Shameri M.A., Alghoul M.A., Sopian K., Zain M.F.M., Elayeb O. // Energy Rev. 2011, 15, Pp. 1468–1475.
19. Study on Energy Efficiency and Energy Saving Potential in Industry from possible Policy Mechanisms. Contract No. ENER/C3/2012-439/S12.666002. A report submitted by ICF Consulting Limited. Date: 1 December 2015.
20. Tsikaloudaki K., Laskos K., Bikas D. On the establishment of climatic zones in Europe with regard to the energy performance of buildings [Текст] / Tsikaloudaki K., Laskos K., Bikas D. // Energies 2012, 5, Pp. 32–44.
21. А.М. Протасевич, А.Б. Крутилин. Классификация вентилируемых фасадных систем. Влияние теплопроводных включений на их теплозащитные характеристики [Текст] / А.М. Протасевич, А.Б. Крутилин // Инженерно-строительный журнал, № 8, 2011. С. 57-62.
22. Амосов А.А, Дубинский Ю.А., Копченова Н.В. Вычислительные методы для инженеров [Текст]: Учеб. пособие. /А.А. Амосов, Ю.А. Дубинский, Н.В. Копченова — М.: Высш. шк., 1994. — 544 с: ил.
23. Андриевский А.А. Энергосбережение и энергетический менеджмент [Текст]: учеб. пособие / А.А. Андриевский, В.И. Володин.-2-е изд., испр. – Мн.:Высш. шк., 2005. – 294 с.
24. Анисимова Е.Ю. Энергоэффективность теплового режима здания при использовании оптимального режима прерывистого отопления [Текст]/ Е.Ю. Анисимова // Вестник ЮУрГУ, №38, 2012/ С. 55-59.

25. Великовский Л. Б., Гуляницкий Н. Ф., Ильинский В. М. и др. Архитектура гражданских и промышленных зданий [Текст]/ Учебник для вузов. В 5 т. Под общ. ред. В. М. Предтеченского. Т. П. Основы проектирования. Изд. 2-е, перераб. и доп. М., Стройиздат, 1976. 215 с. (Моск. инж.-строит, ин-т им. В. В. Куйбышева). Авт.:
26. Ачкасов И.А., Пушкарь Т.А. Управление проектами энергосбережения в жилищно-коммунальном хозяйстве Украины [Текст] / И.А. Ачкасов, Т.А. Пушкарь // Восточно-Европейский журнал передовых технологий 3/12 (51) 2011 г. С.61-65.
27. Басалаев А.А. Модель системы энергоэффективного теплоснабжения зданий [Текст] / А.А. Басалаев // Вестник ЮУрГУ, №23, 2012 г. - С. 216-218.
28. Батинич Р. Вентилируемые фасады зданий: Проблемы строительной теплофизики, систем обеспечения микроклимата и энергосбережения в зданиях [Текст] / Р. Батанич // Сб. докл. IV науч.-практ. конф. М.: НИИСФ, 1999.
29. Бобров Ю.Л., Овчаренко Е.Г., Шойхет Б.М., Петухова Е.Ю. Теплоизоляционные материалы и конструкции [Текст]: Учебник для средних профессионально-технических учебных заведений. -М.: ИНФРА-М, 2003. – 268 с.
30. Богословский В.Н. Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха) [Текст]: Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. / В.Н. Богословский// – М.: Высш. школа, 1982. – 415 с.,ил.
31. Богословский В.Н. Тепловой режим здания [Текст]/ В.Н. Богословский // – М.: - Стройиздат, 1979.-248 с.,ил.
32. Бурцев С.И., Цветков Ю.Н. Влажный воздух. Состав и свойства [Текст]: Учеб. пособие. / С.И. Бурцев, Ю.Н. Цветков // СПб. АХПТ, 1998. 146 с.
33. В. Г. Гагарин, В. В. Козлов, Е. Ю. Цыкановский. Теплозащита фасадов с вентилируемым воздушным зазором [Текст]. / В. Г. Гагарин, В. В. Козлов, Е. Ю. Цыкановский // АВОК, 2004, №2, С.20-26.

34. В. Г. Гагарин, В. В. Козлов, И. А. Мехнечов. Продольная фильтрация воздуха в современных ограждающих конструкциях [Текст]./ В. Г. Гагарин, В. В. Козлов, И. А. Мехнечов // АВОК, 2005, №8, С.60-69.
35. Вакунин Е.И. Анализ способов энергосбережения и повышения энергоэффективности жилых зданий [Текст]./ Е.И. Вакунин // Известия ТулГУ. Науки о земле. 2011 г. Вып.1. С.41-46
36. Васильев Ф. П. Численные методы решения экстремальных задач [Текст] / Ф.П. Васильев // М. 1988.
37. Воробьёв В.А., Адрианов Р.А. Полимерные теплоизоляционные материалы [Текст] / В.А. Воробьев, Р.А. Адрианов //Стройиздат. Москва, К-31.
38. Вредные вещества в промышленности. Справочник для химиков, инженеров и врачей. Изд. 7-е, пер. и доп. В 3-х томах. Под ред. Н.В. Лазарева и Э.Н. Левиной. «Химия», 1976.
39. Гагарин В. Г., Козлов В. В., Садчиков А. В. Учет продольной фильтрации воздуха при оценке теплозащиты стены с вентилируемым фасадом [Текст]/ В.Г. Гагарин, В.В. Козлов, А.В. Садчиков // Промышленное и гражданское строительство. 2005.№ 6. С. 42-45.
40. Гагарин В.Г., Дмитриев К.А. Учет теплотехнических неоднородностей при оценке теплозащиты ограждающих конструкций в России и европейских странах [Текст] / В.Г. Гагарин, К.А. Дмитриев // Строительные материалы. 2013. №6. С. 14–17.
41. Гагарин В.Г., Козлов В.В. Достоинства и недостатки применения ветрозащитных плёнок в вентилируемых фасадах [Текст] / В.Г. Гагарин, В.В. Козлов // Стой ПРОФИЛЬ. 2008. №1. С. 29–33.
42. Гагарин В. Г. О некоторых теплотехнических ошибках, допускаемых при проектировании вентилируемых фасадов [Текст] / В.Г. Гагарин // АВОК. 2005. № 2. С. 52-58.
43. Гагарин В.Г., Козлов В.В. Теплофизические расчеты при проектировании навесных теплоизоляционных фасадных систем с воздушным зазором [Текст] / В.Г. Гагарин, В.В. Козлов // АВОК. 2005.

44. ГОСТ 10140-2003 Плиты теплоизоляционные из минеральной ваты на битумном связующем. Технические условия.
45. ГОСТ 15588-2014 Плиты пенополистирольные теплоизоляционные. Технические условия.
46. ГОСТ 17177-94 Материалы и изделия строительные теплоизоляционные. Методы испытаний.
47. ГОСТ 20916-87 Плиты теплоизоляционные из пенопласта на основе резольных феноло-формальдегидных смол. Технические условия.
48. ГОСТ 21880-2011 Маты из минеральной ваты прошивные теплоизоляционные. Технические условия.
49. ГОСТ 22546-77 Изделия теплоизоляционные из пенопласта ФРП-1. Технические условия (с Изменениями N 1, 2).
50. ГОСТ 22950-95 Плиты минераловатные повышенной жесткости на синтетическом связующем. Технические условия.
51. ГОСТ 30244-94 Материалы строительные. Методы испытаний на горючесть.
52. ГОСТ 4640-2011. Вата минеральная. Технические условия.
53. ГОСТ 6651-94. Термопреобразователи сопротивления. Общие технические требования и методы испытания.
54. ГОСТ 7076-87 Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности.
55. ГОСТ 9573-2012 Плиты из минеральной ваты на синтетическом связующем теплоизоляционные. Технические условия.
56. ГОСТ Р 8.585-2001. ГСИ. Термопары. Номинальные статические характеристики преобразования.
57. ДБН В.2.5-67:2013 ОПАЛЕННЯ, ВЕНТИЛЯЦІЯ ТА КОНДИЦІОNUВАННЯ
58. ДБН В.2.6-31:2016 ТЕПЛОВА ІЗОЛЯЦІЯ БУДІВЕЛЬ
59. Домокеев А.Г. Строительные материалы [Текст] : Учеб. для строит. вузов. – 2-е изд. перераб. и доп. /А.Г. Домокеев – М.: Высш. шк., 1989. – 495 с.: ил.

60. Езерский В.А., Монастырев П.В. Влияние вентилируемого фасада на теплозащитные качества утеплителя [Текст] / В.А. Езерский, П.В. Монастырев // Жилищное строительство. 2003. №3. С. 18–20.
61. Езерский В. А., Монастырев П. В. Крепежный каркас вентилируемого фасада и температурное поле наружной стены [Текст] / В.А. Езерский, П.В. Монастырев // Жилищное строительство. 2003. № 10.
62. Ильин В.А., Куркина А.В. Высшая математика [Текст]: Учебник. /В.А. Ильин, А.В. Куркина - М.: 000 «ТК Велби», 2002.-592 с.
63. Исаченко В.П. и др. Теплопередача [Текст]: Учебник для вузов, Изд. – 3-е, перераб. и доп. М., «Энергия», 1975 488 с. с ил.
64. Колосов М.В. Повышение эффективности систем централизованного теплоснабжения [Текст] Автореферат на соискание ученой степени к.т.н. (специальность 05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика). / М.В. Колосов // Красноярск, 2012. 18 с.
65. Колосов М.В., Борисов Л.Н. Энерго- и ресурсосбережение в системах централизованного теплоснабжения [Текст] / М.В. Колосов, Л.Н. Борисов // 11-я Межд. ИНК «Проблемы энергосбережения и экологии в промышленном и жилищно-коммунальном комплексах» Пенза, 2010. - С. 128-130.
66. Маклакова Т.Г., Нанасова С.М., Бородай Е.Д., Житков В.П. Конструкции гражданских зданий: Учеб.пособиедля ВУЗов [Текст] / Т.Г. Маклакова, С.М. Нанасова, Е.Д.Бородай, В.П. Житков // Под ред. Т.Г. Маклаковой. – М.: Стройиздат,1986. – 135с.: ил.
67. Кутателадзе С.С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление [Текст]: Справочное пособие./ С.С. Кутателадзе — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 367с.
68. Лапин В. Г. , Лапин С. В. Расчет конвективного движения воздуха в канале вентилируемого фасада при наличии горизонтальных щелей между плитками облицовки [Текст]:/ В.Г. Лапин, С.В. Лапин // Приволжский научный журнал. 2012. №2(22). С. 85-92.

69. Маклакова Т. Г. Конструирование крупнопанельных зданий [Текст] / Т.Г. Маклакова - М., Стройнзат, 1975. 159 с.
70. Маклакова Т.Г. Архитектура гражданский и промышленных зданий [Текст]: Учебник для вузов. / Т.Г. Маклакова – М.:Стройиздат,1981. – 368.с., ил.
71. Международный опыт повышения энергоэффективности зданий. Сборник материалов. - Минск: «АЛЬТИОРА - ЖИВЫЕ КРАСКИ» - 2012.
72. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ по оценке эффективности инвестиционных проектов и их отбору для финансирования (утв. Госстроем России, Минэкономики РФ, Минфином РФ, Госкомпромом России 31 марта 1994 г. № 7-12/47)
73. Методические указания для самостоятельной работы студентов к курсовой работе «Тепловая защита зданий» [Текст] / Сост. С.В. Гридин. – Донецк: ДонНТУ. - 2013. – 38 с.
74. Мешалкин Е. А. Пожарная безопасность навесных вентилируемых фасадов / Е.А. Мешалкин // Пожарная безопасность в строительстве. 2011. № 3. С. 40-47.
75. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Ч.1-6. Вып. 1-34. Гидрометеоиздат. 1989 – 1998.
76. Немова Д. В. Навесные вентилируемые фасады: обзор основных проблем [Текст] / Д.В. Немова // Инженерно-строительный журнал. 2010. № 5(15). С. 7-11.
77. Немова Д.В. Интегральные характеристики термогравитационной конвекции в воздушной прослойке навесных вентилируемых фасадов [Текст] / Д.В. Немова // Инженерно-строительный журнал, №2, 2013. С.25-34.
78. О.А. Туснина, А.А. Емельянов, В.М. Туснина. Теплотехнические свойства различных конструктивных систем навесных вентилируемых фасадов [Текст] / О.А. Туснина, А.А. Емельянов, В.М. Туснина // Инженерно-строительный журнал, № 8, 2013. С. 54-63.

79. Овсянников С.Н., Вязова Т.О. Теплозащитные характеристики наружных стеновых конструкций с теплопроводными включениями [Текст]/ С.Н. Овсянников, Т.О. Вязова // Строительные материалы. 2013. №6. С. 24–28.
80. Олейник Б. Приборы и методы температурных измерений [Текст] /Б. Олейник // М.:Издательство стандартов, 1987. – 293 с.
81. Панферов В.И., Анисимова Е.Ю. Эффективная эксплуатация систем отопления [Текст] / В.И. Панферов, Е.Ю. Анисимова// Теплогазоснабжение: состояние, проблемы, перспективы: сб. материалов Всерос. науч.-практ. конф. – Оренбург: ООО«НикОс», 2011. – С. 129–133.
82. Петриченко М. Р., Петросова Д. В., Петроченко М. В. Фильтрационный перенос воздухом консервативной примеси (температуры и теплоты) сквозь стену [Текст] / М.Р. Петриченко, Д.В. Петросова, М.В. Петроченко // НТВ. №4. 2012. С.221-225;
83. Петриченко М. Р., Петроченко М. В. Гидравлика свободно-конвективных течений в ограждающих конструкциях с воздушным зазором [Текст] / М.Р. Петриченко, М.В. Петроченко // Инженерно-строительный журнал. 2011. №8(26). С. 51-56
84. Планирование эксперимента и применение вычислительной техники в процессе синтеза резины. Сборник статей под редакцией д.т.н. В.Ф. Евстратова и к.д.н. А.Г. Шварца. - М.: Химия, 1970.
85. Применение средств ЭВМ при обработке активного эксперимента/ сост. А.Н. Гайдадин, С.А. Ефремова; ВолгГТУ. – Волгоград, 2008. – 16с.
86. Протасевич А.М., Крутилин А.Б. Классификация вентилируемых фасадных систем. Влияние теплопроводных включений на их теплозащитные характеристики [Текст] / А.М. Протасевич, А.Б. Крутилин // Инженерно-строительный журнал. 2011. №8(26). С. 57–62.
87. Протасевич А.М., Крутилин А.Б. Натурные исследования наружных стен зданий, теплоизоляционных по системе «вентилируемый фасад» [Текст] / А.М. Протасевич, А.Б. Крутилин // Современные фасадные системы:

- эффективность и долговечность: Материалы научно-технической конференции. Москва, 21 ноября 2008 г. М.: МГСУ, 2008. С. 212–217.
88. Пшеничный Б.Н., Данилин Ю. М. Численные методы в экстремальных задачах [Текст] / Б.Н. Пшеничный, Ю.М. Данилин - М. 1975.
89. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ И ПРИМЕНЕНИЮ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА И РЕКОНСТРУКЦИИ ЗДАНИЙ В г. МОСКВЕ ФАСАДНОЙ СИСТЕМЫ С ВЕНТИЛИРУЕМЫМ ВОЗДУШНЫМ ЗАЗОРОМ «U-KON» .
90. Рекомендации по проектированию навесных фасадных систем с вентилируемым воздушным зазором для нового строительства и реконструкции зданий. М.: Москкомархитектура, 2002.
91. Ржеганек Я., Яноуш А. Снижение теплопотерь в зданиях [Текст] / Я . Яжеганек, А. Яноуш — М.: Стройиздат, 1988. — 168с:ил.
92. Романов Г.А. Энергоменеджмент на основе ISO 50001 – организационная основа повышения энергоэффективности [Текст] / Г.А. Романов // Энергоаудит. - 2010. - №2. - С. 44-47.
93. Руководство по расчету влажностного режима ограждающих конструкций зданий. Госстрой СССР, НИИСФ. М., “Стройиздат”, 1984.
94. Рябенький В.С. Введение в вычислительную математику [Текст]: Учеб. пособие. — 2-е изд., исправл. / В.С. Рябенький— М.: ФИЗМАТЛИТ, 2000. — 296 с.
95. Садчиков А. В. Влияние продольной фильтрации воздуха в утеплителе на теплозащитные свойства стен с навесными вентилируемыми фасадами [Текст]: Дисс. канд. техн. наук./ А.В. Садчиков - М.: 2007. 248 с.
96. Самаяускас Р., Станкявичюс В., Блюджюс Р. Воздействие конвекции на теплопередачу через вентилируемые ограждения [Текст]/ Р. Самаяускас, В. Станкявичюс, Р. Блюджюс // Каunas : Технология, 2003. 125 с.
97. Сергеев Н.Н. Теоретические аспекты энергосбережения и повышения энергетической эффективности промышленных предприятий [Текст]/ Н.Н. Сергеев // Вестник АГТУ. Сер.: Экономика. 2013. №1/ - С. 29-36.

98. СНиП 2.08.01-89 – Жилые здания.
99. СНиП 23-01-99 Строительная климатология. – М.: Госстрой России, 2004.
100. СНиП 23-02-2003. - Тепловая защита зданий.
101. СНиП II-3-79*. Строительная теплотехника. М.: ГУП ЦПП, 1998.
102. Сніжко Ю. С. Удосконалення регіональної енергетики України в умовах економічної реформи [Текст] / Ю. С. Сніжко // Коммунальное хозяйство городов. — К. : Техніка. — № 98. — 2011. — С. 80—88
103. Солощенко С. С. Влияние вентилируемого зазора на теплофизические характеристики систем наружного утепления фасадов зданий с применением тонкослойной штукатурки [Текст]/ С.С. Солощенко // Инженерно-строительный журнал. 2011. №2(20). С. 39-41.
104. СП 23-101-2004 «Проектирование тепловой защиты зданий»
105. СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий / Минрегион России. М., 2012. 95 с
106. Хоменко В.П., Фаренюк Г.Г. Справочник по теплозащите зданий [Текст]/ В.П. Хоменко, Г.Г. Фаренюк. – К.:Будівельник, 1986. – 216 с.
107. Табунщиков Ю. А., Климовичкий М. С. Расчет теплового режима помещения при раздельном учете конвективной и лучистой составляющих теплообмена [Текст] / Ю.А. Табунщиков, М.С. Климовичкий // Сборник трудов. Тепловой режим и долговечность зданий. М., 1987. 133 с.
108. Типовой проект 1-464А. Пятиэтажный жилой дом на 119 квартир.
109. ТИПОВОЙ ПРОЕКТ I-447с-43 ПЯТИЭТАЖНЫЙ ЧЕТЫРЕХСЕКЦИОННЫЙ ЖИЛОЙ ДОМ НА 56 КВАРТИР.
110. Туснина О.А. Вычислительный комплекс TEPL для теплотехнического расчета строительных конструкций на основе решения задачи стационарной трехмерной теплопроводности [Текст] / О.А. Туснина // Сборник докладов V Международной научно-практической конференции «Научно-техническое творчество молодежи – путь к обществу, основанному на знаниях». М., 2013. С. 154–157.

111. Фасадные теплоизоляционные системы с воздушным зазором. Рекомендации по составу и содержанию документов и материалов, представляемых для технической оценки пригодности продукции. М., Госстрой России, 2004. С.58.
112. Цветков Ф.Ф., Григорьев Б.А. Тепломассообмен [Текст]. Учебное пособие для вузов. – 2-е изд. испр. и доп. / Ф.Ф. Цветков, Б.А Григорьева – М.: Издательство МЭИ, 2005. – 550 с., ил.
113. Пасконов В.М., Полежаев В.И., Чудов Л.А. Численное моделирование процессов тепло- и массообмена [Текст] / Пасконов В.М., Полежаев В.И., Чудов Л.А. – М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1984. – 288 с.
114. Шарапов, В.И. О некоторых законодательных и нормативных актах в области теплоснабжения [Текст] / В.И. Шарапов // Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности : сборник научных трудов Шестой Международной научно-технической конференции. -Ульяновск : УлГТУ. - 2013. - С. 37-54.
115. Шеина С.Г., Никульшина Л.Л., Чулкова Е.В. Оценка эффективности программ энергосбережения в жилищном фонде на примере г. Ростова-на-Дону [Текст] / С.Г. Шеина, Л.Л. Никульшина, Е.В. Чулкова // Сборник трудов международной научной конференции «Интеграция, партнерство и инноваций в строительной науке и образовании». – Москва: МГСУ, 2011. – с. 652-655.
116. Щелоков Я.М. Энергетическое обследование [Текст]: справочное издание. В 2-х томах. Том 1. Теплоэнергетика / Я.М. Щелоков, Н.И. Данилов. - Екатеринбург: Изд-во УрФУ, 2011. - 264 с.
117. Л.В. Примак, Л.Н. Чернышов. Энергосбережение в ЖКХ [Текст]: Учебно-практическое пособие/ Под ред. Л.В. Примака, Л.Н. Чернышова. – М.: Академический проект, Альма Матер, 2011. – 622 с.

118. Явтушенко Е.Б. Основы гидравлического расчета навесных вентилируемых фасадов [Текст]: / Е.Б. Явтушенко // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2013. №2(7). С. 55–61.



ПРИЛОЖЕНИЕ А

Расчетные параметры реконструкции с применением различных теплоизоляционных материалов (Раздел 1)

Таблица А.1 – Входные параметры для расчёта

Расчёт эффективности тепловой изоляции		
Характеристики целевого объекта		
Параметр	Ед.изм.	Значение
1	2	3
Площадь изолируемой поверхности, A_{cm}	м ²	2468,97
Толщина 1-го слоя ограждающей конструкции, δ_1	м	0,01
Толщина 2-го слоя ограждающей конструкции, δ_2	м	0,04
Толщина 3-го слоя ограждающей конструкции, δ_3	м	0,16
Толщина 4-го слоя ограждающей конструкции, δ_4	м	0,04
Теплопроводность материала 1-го слоя, λ_1	Вт/м·°C	0,76
Теплопроводность материала 2-го слоя, λ_2	Вт/м·°C	1,7
Теплопроводность материала 3-го слоя, λ_3	Вт/м·°C	0,09
Теплопроводность материала 4-го слоя, λ_4	Вт/м·°C	1,7
Коэффициент паропроницания материала 1-го слоя, μ_1	мг/м·ч·Па	0,09
Коэффициент паропроницания материала 2-го слоя, μ_2	мг/м·ч·Па	0,03
Коэффициент паропроницания материала 3-го слоя, μ_3	мг/м·ч·Па	0,38
Коэффициент паропроницания материала 4-го слоя, μ_4	мг/м·ч·Па	0,03
Плотность материала 1-го слоя, ρ_1	кг/м ³	1800

1	2	3
Плотность материала 2-го слоя, ρ_2	кг/м ³	2500
Плотность материала 3-го слоя, ρ_3	кг/м ³	200
Плотность материала 4-го слоя, ρ_4	кг/м ³	2500
Сопротивление воздухопроницанию 1-го слоя, R_{inf}	м·ч·Па/МГ	373
Сопротивление воздухопроницанию 2-го слоя, R_{inf}	м·ч·Па/МГ	7848
Сопротивление воздухопроницанию 3-го слоя, R_{inf}	м·ч·Па/МГ	6
Сопротивление воздухопроницанию 4-го слоя, R_{inf}	м·ч·Па/МГ	7848
Высота здания, H	м	13,5
Высота здания от уровня пола 1-го этажа до верха вытяжной шахты, H_{inf}	м	15
Теплотехнические характеристики		
Продолжительность отопительного периода, z_{ht}	сут	183
Расчётная температура внутреннего воздуха, t_{int}	°C	20
Градусо-сутки отопительного периода, D_d	°C·сут	3769,8
Расчётный коэффициент a		0,00035
Расчётный коэффициент b		1,4
Коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности, a_{int}	Вт/м ² ·°C	8,7
Коэффициент теплоотдачи наружной поверхности, a_{ext}	Вт/м ² ·°C	23
Климатические характеристики		
Расчётная температура наружного воздуха, t_{ext}	°C	-22
Средняя температура воздуха за отопительный период, t_{ext}^{cp}	°C	-0,6
Средняя температура периода с отрицательными среднемесячными температурами, t_0^{cp}	°C	-3,6

1	2	3
Продолжительность периода с отрицательными среднемесячными температурами, z_0	мес	3
Продолжительность периода с отрицательными среднемесячными температурами, z_0	сут	102
Парциальное давление водяного пара наружного воздуха за период с отрицательными среднемесячными температурами, e_{ext}^0	Па	407
Парциальное давление водяного пара наружного воздуха за год, e_{ext}	Па	920
Продолжительность летнего периода, z_1	мес	7
Средняя температура летнего периода, t_1	°C	16,6
Продолжительность зимнего периода, z_2	мес	1
Средняя температура зимнего периода, t_2	°C	-5,7
Продолжительность весенне-осеннего периода, z_3	мес	4
Средняя температура весенне-осеннего периода, t_3	°C	-1,1
Парциальное давление водяного пара при t_{int} , E_{int}	Па	2338
Относительная влажность внутреннего воздуха при t_{inn} , φ	%	55
Предельно-допустимое приращение расчётного массового отношения влаги в материале увлажняемого слоя, Δw_{aw}	%	3
Санитарно-гигиенические характеристики		
Нормируемая воздухопроницаемость ограждающей конструкции, G_n	кг/(м ² ·ч)	0,5
Максимальная из средних скоростей ветра по румбам за январь, повторяемость которых 16 % и более, v	м/с	4,8
Нормируемый температурный перепад для наружных стен, Δt	°C	4

1	2	3
Коэффициент n		1
Экономические характеристики		
Номинальная ставка дисконтирования, E_n	год ⁻¹	0,15
Темп инфляции, α	год ⁻¹	0,06
Стоимость тепловой энергии, $c_{т.э.}$	руб/Гкал	1534

Таблица А.2 Параметры теплоизоляционного материала – минвата

Параметры теплоизоляционного материала		
Параметр	Ед.изм.	Значение
1	2	3
Толщина теплоизоляционного слоя, δ_m	м	0,1
Теплопроводность теплоизоляционного слоя, λ_m	Вт/м·°C	0,056
Коэффициент паропроницания теплоизоляционного слоя, μ_m	мг/м·ч·Па	0,049
Сопротивление воздухопроницанию теплоизоляционного слоя, R_{inf}	м ² ·ч·Па/мГ	79
Удельная стоимость теплоизоляционного материала, $c_{т.м.}$	руб/м ³	900
Толщина декоративного слоя, δ_d	м	0,03
Теплопроводность декоративного слоя, λ_d	Вт/м·°C	0,76
Коэффициент паропроницания декоративного слоя, μ_d	мг/м·ч·Па	0,09
Сопротивление воздухопроницанию декоративного слоя, R_{inf}	м ² ·ч·Па/мГ	373
Удельная стоимость монтажных работ (с учётом декоративного слоя), c_m	руб/м ²	200

1	2	3
Срок службы, T_{cl}	лет	30

Таблица А.3 Выходные параметры для минеральной ваты

Выходные данные		
Параметр	Ед.изм	Значение
1	2	3
Сопротивления теплопередаче		
Требуемое сопротивление теплопередаче, R^{req}	$\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$	2,719
Сопротивление теплопередаче существующей конструкции, R_c	$\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$	1,996
Сопротивление теплопередаче конструкции после утепления, R^{des}	$\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$	3,822
Сопротивление теплопередаче до плоскости возможной конденсации, R^e	$\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$	1,929
Сопротивление теплопередаче между наружной поверхностью и плоскостью возможной конденсации, R^e	$\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$	1,892
Параметры паропроницания		
Сопротивление паропроницанию всей конструкции, R_{vp}^0	$\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}/\text{МГ}$	5,57
Сопротивление паропроницанию до плоскости возможной конденсации, R_{vp}^{des}	$\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}/\text{МГ}$	1,87
Сопротивление паропроницанию между наружной поверхностью и плоскостью возможной конденсации, R_{vp}^e	$\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}/\text{МГ}$	3,71

1	2	3
Температура в плоскости возможной конденсации за период с отрицательными среднемесячными температурами, τ_0	°C	8,1
Температура в плоскости возможной конденсации за летний период, τ_l	°C	18,3
Температура в плоскости возможной конденсации за зимний период, τ_2	°C	7,0
Температура в плоскости возможной конденсации за осенне-весенний период, τ_3	°C	9,3
Парциальное давление насыщенного водяного пара в плоскости возможной конденсации за период с отрицательными среднемесячными температурами, E_0	Па	1078,4
Парциальное давление насыщенного водяного паров плоскости возможной конденсации за летний период, E_l	Па	2102,2
Парциальное давление насыщенного водяного пара в плоскости возможной конденсации за зимний период, E_2	Па	1002,8
Парциальное давление насыщенного водяного пара в плоскости возможной конденсации за осенне-весенний период, E_3	Па	1174,8
Парциальное давление насыщенного водяного пара в плоскости возможной конденсации за год, E	Па	1701,5

1	2	3
Парциальное давление насыщенного водяного пара при t_{int} , e_{int}	Па	1285,9
Коэффициент η		44,33
Нормируемое сопротивление паропроницанию (годовой период), R_{vp1}^{req}	$\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}/\text{МГ}$	-1,972
Нормируемое сопротивление паропроницанию (период с отрицательными среднемесячными температурами), R_{vp2}^{req}	$\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}/\text{МГ}$	0,362
Санитарно-гигиенические параметры		
Разность давлений воздуха на наружной и внутренней поверхности ограждающей конструкции, Δp	Па	26,35
Требуемое сопротивление воздухопроницанию ограждающей конструкции, R_{inf}^{req}	$\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}/\text{кг}$	52,69
Расчётное значение сопротивлению ограждающей конструкции, R_{inf}^{des}	$\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}/\text{кг}$	16527
Расчётный температурный перепад, Δt	$^{\circ}\text{C}$	1,29
Экономические параметры		
Реальная ставка дисконтирования, E_p	год^{-1}	0,038
Коэффициент дисконтирования (за период эксплуатации)	год^{-1}	18,45
Капитальные затраты, К	руб	962898,3
Экономический эффект, Э	руб	69627,99
Чистый дисконтированный доход, ЧДД	руб	321622,81

1	2	3
Индекс доходности, ИД		0,33
Дисконтированный срок окупаемости, Т_{ок}	лет	18,9

Таблица А.4 Параметры теплоизоляционного материала – пенополистирол

Параметры теплоизоляционного материала		
Параметр	Ед.изм.	Значение
1	2	3
Толщина теплоизоляционного слоя, δ_m	м	0,1
Теплопроводность теплоизоляционного слоя, λ_m	Вт/м·°C	0,038
Коэффициент паропроницания теплоизоляционного слоя, μ_m	мг/м·ч·Па	0,03
Сопротивление воздухопроницанию теплоизоляционного слоя, R_{inf}	м ² ·ч·Па/мг	79
Удельная стоимость теплоизоляционного материала, $c_{m.m.}$	руб/м ³	1100
Толщина декоративного слоя, δ_d	м	0,03
Теплопроводность декоративного слоя, λ_d	Вт/м·°C	0,76
Коэффициент паропроницания декоративного слоя, μ_d	мг/м·ч·Па	0,09
Сопротивление воздухопроницанию декоративного слоя, R_{inf}	м ² ·ч·Па/мг	373
Удельная стоимость монтажных работ (с учётом декоративного слоя), c_m	руб/м ²	250
Срок службы, T_{cl}	лет	30

Таблица А.5 Выходные параметры для пенополистирола

<i>Выходные данные</i>		
Параметр	Ед.изм	Значение
1	2	3
Сопротивления теплопередаче		
Требуемое сопротивление теплопередаче, R^{req}	$\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$	2,719
Сопротивление теплопередаче существующей конструкции, R_c	$\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$	1,996
Сопротивление теплопередаче конструкции после утепления, R^{des}	$\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$	4,667
Сопротивление теплопередаче до плоскости возможной конденсации, R^e	$\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$	1,929
Сопротивление теплопередаче между наружной поверхностью и плоскостью возможной конденсации, R^e	$\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$	2,738
Параметры паропроницания		
Сопротивление паропроницанию всей конструкции, R_{vp}^0	$\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}/\text{мГ}$	6,87
Сопротивление паропроницанию до плоскости возможной конденсации, R_{vp}^{des}	$\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}/\text{мГ}$	1,87
Сопротивление паропроницанию между наружной поверхностью и плоскостью возможной	$\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}/\text{мГ}$	5,00
Температура в плоскости возможной конденсации за период с отрицательными среднемесечными	$^\circ\text{C}$	10,2
Температура в плоскости возможной конденсации за летний период, τ_1	$^\circ\text{C}$	18,6
Температура в плоскости возможной конденсации за зимний период, τ_2	$^\circ\text{C}$	9,4

1	2	3
Температура в плоскости возможной конденсации за осенне-весенний период, τ_3	°C	11,3
Парциальное давление насыщенного водяного пара в плоскости возможной конденсации за период с отрицательными среднемесячными температурами, E_0	Па	1247,9
Парциальное давление насыщенного водяного пара в плоскости возможной конденсации за летний период, E_1	Па	2143,7
Парциальное давление насыщенного водяного пара в плоскости возможной конденсации за зимний период, E_2	Па	1177,1
Парциальное давление насыщенного водяного пара в плоскости возможной конденсации за осенне-весенний период, E_3	Па	1337,0
Парциальное давление насыщенного водяного пара в плоскости возможной конденсации за год, E	Па	1794,2
Парциальное давление насыщенного водяного пара при t_{int} , e_{int}	Па	1285,9
Коэффициент η		41,17
Нормируемое сопротивление паропроницанию (годовой период), R_{vp1}^{req}	$m^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}/\text{мГ}$	-2,907
Нормируемое сопротивление паропроницанию (период с отрицательными среднемесячными температурами), R_{vp2}^{req}	$m^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}/\text{мГ}$	0,068
Санитарно-гигиенические параметры		

1	2	3
Разность давлений воздуха на наружной и внутренней поверхности ограждающей конструкции, Δp	Па	26,35
Требуемое сопротивление воздухопроницанию ограждающей конструкции, R_{inf}^{req}	$m^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}/\text{кг}$	52,69
Расчётное значение сопротивлению ограждающей конструкции, R_{inf}^{des}	$m^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}/\text{кг}$	16527
Расчётный температурный перепад, Δt	$^\circ\text{C}$	1,06
Экономические параметры		
Реальная ставка дисконтирования, E_p	год ⁻¹	0,038
Коэффициент дисконтирования (за период эксплуатации)	год ⁻¹	18,45
Капитальные затраты, К	руб	888829,2
Экономический эффект, Э	руб	83855,57
Чистый дисконтированный доход, ЧДД	руб	658167,08
Индекс доходности, ИД		0,74
Дисконтированный срок окупаемости, Т_{ок}	лет	13,1

Таблица А.6 Параметры теплоизоляционного материала – пенопласт

Параметры теплоизоляционного материала		
Параметр	Ед.изм.	Значение
1	2	3
Толщина теплоизоляционного слоя, δ_m	м	0,1
Теплопроводность теплоизоляционного слоя, λ_m	Вт/м· $^\circ\text{C}$	0,047
Коэффициент паропроницания теплоизоляционного слоя, μ_m	мг/м·ч·Па	0,23

1	2	3
Сопротивление воздухопроницанию теплоизоляционного слоя, R_{inf}	м ² ·ч·Па/мГ	79
Удельная стоимость теплоизоляционного материала, $c_{m.m.}$	руб/м ³	1000
Толщина декоративного слоя, δ_d	м	0,03
Теплопроводность декоративного слоя, λ_d	Вт/м·°C	0,76
Коэффициент паропроницания декоративного слоя, μ_d	мГ/м·ч·Па	0,09
Сопротивление воздухопроницанию декоративного слоя, R_{inf}	м ² ·ч·Па/мГ	373
Удельная стоимость монтажных работ (с учётом декоративного слоя), c_m	руб/м ²	250
Срок службы, T_{cl}	лет	30

Таблица А.7 Выходные параметры для пенопласта

Выходные данные		
Параметр	Ед.изм	Значение
1	2	3
Сопротивления теплопередаче		
Требуемое сопротивление теплопередаче, R^{req}	м ² ·°C/Вт	2,719
Сопротивление теплопередаче существующей конструкции, R_c	м ² ·°C/Вт	1,996
Сопротивление теплопередаче конструкции после утепления, R^{des}	м ² ·°C/Вт	4,164
Сопротивление теплопередаче до плоскости возможной конденсации, R^e	м ² ·°C/Вт	1,929

1	2	3
Сопротивление теплопередаче между наружной поверхностью и плоскостью возможной конденсации, R^e	$\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$	2,234
Параметры паропроницания		
Сопротивление паропроницанию всей конструкции, R_{vp}^0	$\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}/\text{МГ}$	3,97
Сопротивление паропроницанию до плоскости возможной конденсации, R_{vp}^{des}	$\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}/\text{МГ}$	1,87
Сопротивление паропроницанию между наружной поверхностью и плоскостью возможной конденсации, R_{vp}^e	$\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}/\text{МГ}$	2,10
Температура в плоскости возможной конденсации за период с отрицательными среднемесячными температурами, τ_0	$^\circ\text{C}$	9,1
Температура в плоскости возможной конденсации за летний период, τ_1	$^\circ\text{C}$	18,4
Температура в плоскости возможной конденсации за зимний период, τ_2	$^\circ\text{C}$	8,1
Температура в плоскости возможной конденсации за осенне-весенний период, τ_3	$^\circ\text{C}$	10,2
Парциальное давление насыщенного водяного пара в плоскости возможной конденсации за период с отрицательными среднемесячными температурами, E_0	Па	1152,5
Парциальное давление насыщенного водяного парав плоскости возможной конденсации за летний период, E_1	Па	2120,9

1	2	3
Парциальное давление насыщенного водяного пара в плоскости возможной конденсации за зимний период, E_2	Па	1078,8
Парциальное давление насыщенного водяного пара в плоскости возможной конденсации за осенне-весенний период, E_3	Па	1246,0
Парциальное давление насыщенного водяного пара в плоскости возможной конденсации за год, E	Па	1742,5
Парциальное давление насыщенного водяного пара при t_{int} , e_{int}	Па	1285,9
Коэффициент η		86,85
Нормируемое сопротивление паропроницанию (годовой период), R_{vp1}^{req}	$\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}/\text{мГ}$	-1,167
Нормируемое сопротивление паропроницанию (период с отрицательными среднемесячными температурами), R_{vp2}^{req}	$\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}/\text{мГ}$	0,179
Санитарно-гигиенические параметры		
Разность давлений воздуха на наружной и внутренней поверхности ограждающей конструкции, Δp	Па	26,35
Требуемое сопротивление воздухопроницанию ограждающей конструкции, R_{inf}^{req}	$\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}/\text{кГ}$	52,69
Расчётное значение сопротивлению ограждающей конструкции, R_{inf}^{des}	$\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}/\text{кГ}$	16527
Расчётный температурный перепад, Δt	$^\circ\text{C}$	1,19
Экономические параметры		
Реальная ставка дисконтирования, Er	год^{-1}	0,038

1	2	3
Коэффициент дисконтирования (за период эксплуатации)	год ⁻¹	18,45
Капитальные затраты, К	руб	864139,5
Экономический эффект, Э	руб	76082,35
Чистый дисконтированный доход, ЧДД	руб	539453,77
Индекс доходности, ИД		0,62
Дисконтированный срок окупаемости, Т_{ок}	лет	14,4

Таблица А.8 Параметры теплоизоляционного материала – пенополиуретан

Параметры теплоизоляционного материала		
Параметр	Ед.изм.	Значение
1	2	3
Толщина теплоизоляционного слоя, δ_m	м	0,1
Теплопроводность теплоизоляционного слоя, λ_m	Вт/м·°C	0,029
Коэффициент паропроницания теплоизоляционного слоя, μ_m	мг/м·ч·Па	0,05
Сопротивление воздухопроницанию теплоизоляционного слоя, R_{inf}	м ² ·ч·Па/мг	79
Удельная стоимость теплоизоляционного материала, $c_{m.m.}$	руб/м ³	2000
Толщина декоративного слоя, δ_d	м	0,03
Теплопроводность декоративного слоя, λ_d	Вт/м·°C	0,76
Коэффициент паропроницания декоративного слоя, μ_d	мг/м·ч·Па	0,09
Сопротивление воздухопроницанию декоративного слоя, R_{inf}	м ² ·ч·Па/мг	373

1	2	3
Удельная стоимость монтажных работ (с учётом декоративного слоя), c_m	руб/м ²	150
Срок службы, T_{cl}	лет	30

Таблица А.9 Выходные параметры для пенополиуретана

Выходные данные		
Параметр	Ед.изм	Значение
1	2	3
Сопротивления теплопередаче		
Требуемое сопротивление теплопередаче, R^{req}	м ² ·°C/Вт	2,719
Сопротивление теплопередаче существующей конструкции, R_c	м ² ·°C/Вт	1,996
Сопротивление теплопередаче конструкции после утепления, R^{des}	м ² ·°C/Вт	5,484
Сопротивление теплопередаче до плоскости возможной конденсации, R^e	м ² ·°C/Вт	1,929
Сопротивление теплопередаче между наружной поверхностью и плоскостью возможной конденсации, R^e	м ² ·°C/Вт	3,555
Параметры паропроницания		
Сопротивление паропроницанию всей конструкции, R_{vp}^0	м ² ·ч·Па/мГ	5,53
Сопротивление паропроницанию до плоскости возможной конденсации, R_{vp}^{des}	м ² ·ч·Па/мГ	1,87

1	2	3
Сопротивление паропроницанию между наружной поверхностью и плоскостью возможной конденсации, R_{vp}^{δ}	м ² ·ч·Па/мг	3,67
Температура в плоскости возможной конденсации за период с отрицательными среднемесячными температурами, τ_0	°C	11,7
Температура в плоскости возможной конденсации за летний период, τ_1	°C	18,8
Температура в плоскости возможной конденсации за зимний период, τ_2	°C	11,0
Температура в плоскости возможной конденсации за осенне-весенний период, τ_3	°C	12,6
Парциальное давление насыщенного водяного пара в плоскости возможной конденсации за период с отрицательными среднемесячными температурами, E_0	Па	1374,7
Парциальное давление насыщенного водяного парав плоскости возможной конденсации за летний период , E_1	Па	2172,0
Парциальное давление насыщенного водяного пара в плоскости возможной конденсации за зимний период, E_2	Па	1308,9
Парциальное давление насыщенного водяного пара в плоскости возможной конденсации за осенне-весенний период, E_3	Па	1456,8
Парциальное давление насыщенного водяного пара в плоскости возможной конденсации за год, E	Па	1861,7

1	2	3
Парциальное давление насыщенного водяного пара при t_{int} , e_{int}	Па	1285,9
Коэффициент η		64,61
Нормируемое сопротивление паропроницанию (годовой период), R_{vp1}^{req}	$\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}/\text{мГ}$	-2,242
Нормируемое сопротивление паропроницанию (период с отрицательными среднемесячными температурами), R_{vp2}^{req}	$\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}/\text{мГ}$	-0,135
Санитарно-гигиенические параметры		
Разность давлений воздуха на наружной и внутренней поверхности ограждающей конструкции, Δp	Па	26,35
Требуемое сопротивление воздухопроницанию ограждающей конструкции, R_{inf}^{req}	$\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}/\text{кг}$	52,69
Расчётное значение сопротивлению ограждающей конструкции, R_{inf}^{des}	$\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}/\text{кг}$	16527
Расчётный температурный перепад, Δt	$^{\circ}\text{C}$	0,90
Экономические параметры		
Реальная ставка дисконтирования, E_p	год ⁻¹	0,038
Коэффициент дисконтирования (за период эксплуатации)	год ⁻¹	18,45
Капитальные затраты, К	руб	864139,5
Экономический эффект, Э	руб	93397,89
Чистый дисконтированный доход, ЧДД	руб	858896,81

1	2	3
Индекс доходности, ИД		0,99
Дисконтированный срок окупаемости, Т_{ок}	лет	11,1

Приложение Б

Данные расчета параметров для определения эффективной толщины теплоизоляционного слоя

Таблица Б.1 Входные данные для расчёта

Расчёт эффективной толщины тепловой изоляции		
Характеристики целевого объекта		
1	2	3
Параметр	Ед.изм.	Значение
Площадь изолируемой поверхности, $A_{ст}$	m^2	1225,43
Толщина 1-го слоя ограждающей конструкции, δ_1	м	0,01
Толщина 2-го слоя ограждающей конструкции, δ_2	м	0,3
Теплопроводность материала 1-го слоя, λ_1	$Bt/m \cdot ^\circ C$	0,76
Теплопроводность материала 2-го слоя, λ_2	$Bt/m \cdot ^\circ C$	0,58
Коэффициент паропроницания материала 1-го слоя, μ_1	$mg/m \cdot ch \cdot Pa$	0,09
Коэффициент паропроницания материала 2-го слоя, μ_2	$mg/m \cdot ch \cdot Pa$	0,14
Плотность материала 1-го слоя, ρ_1	kg/m^3	1800
Плотность материала 2-го слоя, ρ_2	kg/m^3	1600
Высота здания, H	м	9,8
Высота здания от уровня пола 1-го этажа до верха вытяжной шахты, H_{inf}	м	10,6
Теплотехнические характеристики		
Продолжительность отопительного периода, Z_{ht}	сут	183
Продолжительность отопительного периода, Z_{ht}	с	15811200
Расчётная температура внутреннего воздуха, t_{int}	$^\circ C$	20
Градусо-сутки отопительного периода, Dd	$^\circ C \cdot сут$	3769,8
Расчётный коэффициент а		0,00035

1	2	3
Расчётный коэффициент b		1,4
Коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности, a_{int}	Вт/м ² ·°C	8,7
Коэффициент теплоотдачи наружной поверхности, a_{ext}	Вт/м ² ·°C	22
Климатические характеристики		
Расчётная температура наружного воздуха, t_{ext}	°C	-22
Средняя температура воздуха за отопительный период, t_{ext}^{cp}	°C	-0,6
Средняя температура периода с отрицательными среднемесячными температурами, t_0^{cp}	°C	-3,6
Продолжительность периода с отрицательными среднемесячными температурами, z_0	мес	3
Продолжительность периода с отрицательными среднемесячными температурами, z_0	сут	102
Парциальное давление водяного пара наружного воздуха за период с отрицательными среднемесячными температурами, e_{ext}^0	Па	407
Парциальное давление водяного пара наружного воздуха за год, e_{ext}	Па	920
Продолжительность летнего периода, z_1	мес	7
Средняя температура летнего периода, t_1	°C	16,6
Продолжительность зимнего периода, z_2	мес	1
Средняя температура зимнего периода, t_2	°C	-5,7
Продолжительность весенне-осеннего периода, z_3	мес	4
Средняя температура весенне-осеннего периода, t_3	°C	-1,1
Парциальное давление водяного пара при t_{int} , E_{int}	Па	2338

1	2	3
Относительная влажность внутреннего воздуха при t_{int} , ϕ	%	55
Предельно-допустимое приращение расчётного массового отношения влаги в материале увлажняемого слоя, ΔW_{aw}	%	3
Санитарно-гигиенические характеристики		
Нормируемая воздухопроницаемость ограждающей конструкции, G_n	кг/(м ² ·ч)	0,5
Максимальная из средних скоростей ветра по румбам за январь, повторяемость которых 16 % и более, v	м/с	4,8
Нормируемый температурный перепад для наружных стен, Δt	°C	4
Коэффициент n		1
Экономические характеристики		
Номинальная ставка дисконтирования, E_n	год ⁻¹	0,15
Темп инфляции, a	год ⁻¹	0,06
Стоимость тепловой энергии, $c_{т.э.}$	руб/Гкал	1534
Параметры теплоизоляционного материала		
Толщина теплоизоляционного слоя, δ_t	м	δ_t
Теплопроводность теплоизоляционного слоя, λ_t	Вт/м·°C	0,031
Коэффициент паропроницания теплоизоляционного слоя, μ_t	мг/м·ч·Па	0,03
Удельная стоимость теплоизоляционного материала, $c_{т.м.}$	руб/м ³	1100
Толщина декоративного слоя, δ_d	м	0,03

1	2	3
Теплопроводность декоративного слоя, λ_d	Вт/м·°C	0,76
Коэффициент паропроницания декоративного слоя, μ_d	мг/м·ч·Па	0,09
Удельная стоимость монтажных работ (с учётом декоративного слоя), c_m .	руб/м ²	250
Срок службы, T_{cl}	лет	30

Таблица Б.2 Промежуточные выходные данные

Выходные данные		
Параметр	Ед.изм	Значение
1	2	3
Сопротивления теплопередаче		
Требуемое сопротивление теплопередаче, R^{req}	м ² ·°C/Вт	2,719
Сопротивление теплопередаче существующей конструкции, R_c	м ² ·°C/Вт	0,689
Сопротивление теплопередаче до плоскости возможной конденсации, R^b	м ² ·°C/Вт	0,467
Параметры паропроницания		
Сопротивление паропроницанию до плоскости возможной конденсации, R_{vp}^{des}	м ² ·ч·Па/мГ	1,52
Парциальное давление насыщенного водяного пара при t_{int} , e_{int}	Па	1285,9
Экономические параметры		
Реальная ставка дисконтирования, Ер	год ⁻¹	0,085
Коэффициент дисконтирования (за период эксплуатации)	год ⁻¹	11,67

Приложение В

Точечное утепление. Пятиэтажный кирпичный дом типовой серии 1- 447С

Для расчёта выбрано 5-ти этажное панельное здание типовой серии I-447С. Наружные стены толщиной 0,5 м выполнены из силикатного кирпича. Имеются отапливаемые чердаки. Имеются отапливаемые подполья. Для определения характеристик ограждающих конструкций использовался типовой проект для здания типовой серии I-447С [109].

Для полноты расчёта были выбраны три квартиры – угловая квартира первого этажа, угловая квартира пятого этажа и угловая квартира третьего этажа:

- характеристики ограждающих конструкций

Наружные стены здания . Наружные стены выполнены из силикатного кирпича. Толщина стен – 0,5 м. Полное сопротивление теплопередачи R кладки из силикатного кирпича указанной толщины – $1,12 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Bt}$.

Светопрозрачные конструкции представляют собой окна с двойным остеклением из обычного стекла в спаренных переплётах. Приведенное сопротивление теплопередаче R_0 такой конструкции – $0,4 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Bt}$. Полное сопротивление теплопередаче окон – $0,568 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Bt}$

Плиты перекрытия над подпольем – железобетонные плиты толщиной 0,22 м. Сопротивление теплопередаче с учётом деревянных полов – $0,578 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Bt}$.

Стены квартиры, выходящие в подъезд, железобетонные толщиной $\delta = 0,25$ м. Сопротивление теплопередаче внутренних стен – $0,377 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Bt}$.

Перекрытия в тёплых чердаках - железобетонные пустотные плиты (рис. 1) толщиной $\delta = 0,22$ м. Теплопроводность железобетона $\lambda = 1,7 \text{ Bt/m} \cdot \text{°C}$.

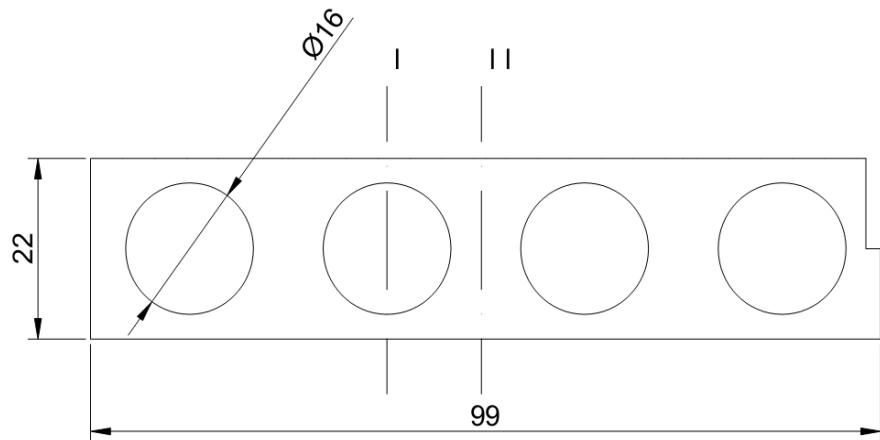


Рисунок В.1- Панель перекрытия

Сопротивление теплопередаче такой плиты определяется отдельно для сечений I и II. При этом для упрощения круглые пустоты заменяются на равновеликие по площади квадраты со сторонами 0,14 м. А потом находится среднее сопротивление теплопередаче для такой панели, которое составляет – 0,156 $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$. Термическое сопротивление горизонтальной воздушной прослойки – 0,21 $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$. Полное сопротивление теплопередаче такой плиты составляет – 0,423 $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$.

Аналогично, с использованием проектной документации и климатических данных для г. Донецк, определяются характеристики здания, тепловые потери через ограждающие конструкции и потенциальная температура внутреннего воздуха для каждого варианта расположения квартиры (таб. 1 - 4). Особенностью рассматриваемого здания является наличие теплых чердаков, температура которых составляет 14°C, что вносит корректировки в определение тепловых потерь и потенциальной температуры внутреннего воздуха.

Таблица В.1 Характеристики ограждающих конструкций квартир

Характеристика	Ед. изм.	Значение
1	2	3
Площадь утепляемых наружных стен, A_h	м^2	34,26
Сопротивление теплопередаче наружных стен, R_h	$\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$	1,12
Площадь внутренних стен, выходящих в подъезд, $A_{под}$	м^2	5,5

1	2	3
Сопротивление теплопередаче стен, выходящих в	$\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$	0,377
Площадь перекрытия полов (для 1-го этажа), $A_{\text{пл}}$	м^2	61,32
Сопротивление теплопередаче перекрытия полов, $R_{\text{пл}}$	$\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$	0,578
Площадь перекрытия над верхним этажом (кровля)	м^2	61,32
Сопротивление теплопередаче перекрытия над верхним	$\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$	0,423
Площадь окон, A_c	м^2	10,57
Сопротивление теплопередаче окон, R_c	$\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$	34,26

Таблица В.2 Расчётные характеристики

Параметр	Ед.изм.	Значение
Фактическая температура внутреннего воздуха, t_{int}^{ϕ}	$^{\circ}\text{C}$	18
Средняя температура воздуха за отопительный	$^{\circ}\text{C}$	-0,6
Температура воздуха в подъезде, $t_{\text{int}}^{\text{под}}$	$^{\circ}\text{C}$	16
Температура воздуха в подвале (подполье), $t_{\text{int}}^{\text{под}}$	$^{\circ}\text{C}$	14
Температура теплого чердака, $t_{\text{int}}^{\text{пт}}$	$^{\circ}\text{C}$	14
Толщина предполагаемого теплоизоляционного	м	0,15
Теплопроводности материала теплоизоляционного	$\text{Вт}/\text{м} \cdot ^{\circ}$	0,037

- расчёт тепловых потерь

Таблица В.3 Данные по тепловым потерям

Тепловые потери	Ед. изм	Значение
Тепловые потери через наружные стены, Q_h	Вт	568,96
Тепловые потери через перекрытия верхнего этажа (для	Вт	463,89
Тепловые потери через перекрытия пола (для квартир)	Вт	254,62
Тепловые потери в подъезд, $Q_{\text{под}}$	Вт	29,18
Тепловые потери через окна, Q_c	Вт	346,13

Таблица В.4 Общие тепловые потери рассматриваемых квартир в зависимости от расположения в здании

Общие тепловые потери Q_t	Ед. изм.	Значение
Угловая квартира 3-го этажа	Вт	944,27
Угловая квартира пятого этажа	Вт	1408,16
Угловая квартира первого этажа	Вт	1198,88

Температура воздуха в квартире при различном расположении квартиры представлена в таблице 5.

Примечание. Значительный рост температуры внутреннего воздуха в квартире может привести тепловым потерям в соседние квартиры через внутренние стены, т.к. в соседних квартирах температура воздуха осталась на прежнем уровне. Чтобы учесть это явление необходимо внести некоторые изменения в формулу для расчёта потенциальной температуры внутреннего воздуха – добавить тепловые потери в соседние квартиры

$$t_{\text{int}} = \frac{Q_m + (t_{\text{ext}}^{cp} \left(\frac{A_u}{R_h + \frac{\delta_m}{\lambda_m}} + \frac{A_c}{R_c} \right)) + t_{\text{noo}}^{\text{noo}} \cdot \frac{A_{\text{noo}}}{R_{\text{noo}}} + t_{\text{int}}^{\kappa\kappa} \cdot \left(\frac{A_{\kappa\kappa}}{R_{\kappa\kappa}} \right)}{\frac{A_u}{R_h + \frac{\delta_m}{\lambda_m}} + \frac{A_c}{R_c} + \frac{A_{\text{noo}}}{R_{\text{noo}}} + \frac{A_{\kappa\kappa}}{R_{\kappa\kappa}}} \quad (1)$$

где $t_{\text{int}}^{\kappa\kappa}$ - температура воздуха в соседних квартирах, $^{\circ}\text{C}$;

$A_{\kappa\kappa}$ - площадь стен, граничащих с соседними квартирами, m^2

$R_{\kappa\kappa}$ – сопротивление теплопередаче стен, граничащих с соседними квартирами, $\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$.

В рассматриваемом здании внутренние стены имеют толщину 0,5 м и выполнены из полнотелого силикатного кирпича с $\lambda = 0,7 \text{ Вт}/\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C}$. Полное сопротивление теплопередаче такой стенки $R_{\kappa\kappa}$ равно $0,944 \text{ м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$. Площадь стен, граничащих с соседними квартирами равна $26,14 \text{ м}^2$.

Таблица B.5 Значение температуры внутреннего t_{int} воздуха после проведения «точечного» утепления.

Расположение квартиры	Ед. изм.	Значение
Угловая квартира 3-го этажа	$^{\circ}\text{C}$	24,8
Угловая квартира пятого этажа	$^{\circ}\text{C}$	20,9
Угловая квартира первого этажа	$^{\circ}\text{C}$	22,3

Приложение Г

Кирпичное пятиэтажное жилое здание серии I-447 типовой

Для расчета влажностного режима системы вентилируемого фасада используем технические характеристики и расчетные данные, полученные в П. 3.5 раздела 3.

Для построения графиков распределения температур необходимо разбить конструкцию на несколько слоев, при этом границы конструкционных слоев совпадают с границами материалов конструкции, а теплоизоляционный слой дополнительно разбивается на 4-е слоя. На графике по оси Ох откладываются значения сопротивления теплопередаче элементов конструкции, а по оси Оу – значения температур. В качестве температур наружного воздуха используются средние температуры зимнего, летнего и осенне-весеннего периодов для г. Донецка. Характеристики элементов конструкции и значения температур представлены в таблицах 1-2.

Таблица Г.1 – Характеристики слоев конструкции

№ п/п слоя	Конструкционная граница	Толщина слоя, м	Теплопроводность, $B_T/M \cdot ^\circ C$	Сопротивление теплопередаче слоя, R $M^2 \cdot ^\circ C/B_T$	Сопротивление теплопередаче конструкции, R $M^2 \cdot ^\circ C/B_T$
1	2	3	4	5	6
1	внутренний воздух/штукатурка	-	-	0,115	0,115
2	штукатурка/кирпичная кладка	0,01	0,64	0,016	0,131

1	2	3	4	5	6
3	кирпичная кладка/минвата	0,5	0,76	0,658	0,789
4	минвата	0,0375	0,056	0,670	1,458
5	минвата	0,0375	0,056	0,670	2,128
6	минвата	0,0375	0,056	0,670	2,797
7	минвата/воздушная прослойка	0,0375	0,056	0,670	3,467
8	воздушная прослойка/декорат ивный слой	0,06		0,34	3,644
9	декоративный слой\наружный воздух	0,03	3,5	0,009	3,652

Таблица Г.2 – Распределение температур по слоям

№ п/п слоя	Температура слоя, °C		
	зима	лето	осень/весна
1	19,2	19,9	19,4
2	19,1	19,9	19,3
3	14,7	19,3	15,7
4	10,3	18,7	12,0
5	5,8	18,1	8,4
6	1,4	17,5	4,7
7	-3,1	16,9	1,0
8	-5,4	16,6	-0,8
9	-5,4	16,6	-0,9

График распределения температур по слоям конструкции представлен на рисунке 1.

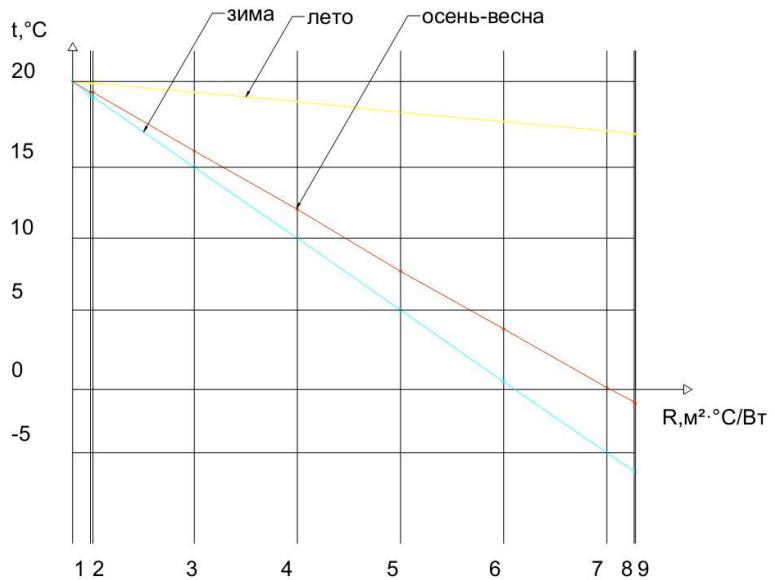


Рисунок Г.1 – Распределение температуры по слоям

Следующим этапом является нахождение парциальных давлений водяного пара и воздуха по слоям конструкции для периодов года. Параметры наружного и внутреннего воздуха, необходимы для расчета, представлены в таблице 3. Парциальное давление водяного пара наружного воздуха принимается согласно климатическим данным для г. Донецк. Парциальное давление водяного пара на входе в прослойку принимается равной $1,05 \cdot e_{ext}$.

Таблица Г.3 – Параметры внутреннего и наружного воздуха

Параметр	Ед.изм.	Значение
Расчетная температура внутреннего воздуха, t_{int}	°C	20
Парциальное давление водяного пара в помещении, e_{int}	Па	1285,9
Парциальное давление водяного пара зимнего периода, e_{ext1}	Па	321
Парциальное давление водяного пара летнего периода, e_{ext2}	Па	1213
Парциальное давление водяного пара осенне-весеннего периода, e_{ext3}	Па	533
Парциальное давление водяного пара на входе в прослойку для зимнего периода, e_0	Па	337,05
Парциальное давление водяного пара на входе в прослойку для летнего периода, e_0	Па	1273,65
Парциальное давление водяного пара на входе в прослойку для осенне-весеннего периода, e_0	Па	559,65

Для рассматриваемой системы навесного вентилируемого фасада размер панели составляет $1,2 \times 0,6$ м. На 1 м² панелей приходится 0,03 м² зазора. Таким образом, приведенное сопротивление паропроницанию декоративного слоя составило 0,935 м²·ч·Па/мг. Значения сопротивлений паропроницанию по слоям конструкции представлены в таблице 4.

Таблица Г.4. – Сопротивление паропроницанию элементов конструкции

№ п/п слоя	Конструкционная граница	Толщина слоя, м	Коэффициент паропроницания, мг/м·ч · Па	Сопротивление паропроницанию слоя, R _{vp} м ² ·ч·Па/мг	Сопротивление паропроницанию конструкции, R м ² ·ч·Па/мг
1	внутренний воздух/штукатурка	-	-	-	
2	штукатурка/кирпичная кладка	0,01	0,09	0,111	0,111
3	кирпичная кладка/минвата	0,5	0,11	4,545	4,657
4	минвата	0,0375	0,6	0,063	4,719
5	минвата	0,0375	0,6	0,063	4,782
6	минвата	0,0375	0,6	0,063	4,844
7	минвата/воздушная прослойка	0,0375	0,6	0,063	4,907

Значения парциального давления насыщенного водяного пара Е по слоям конструкции определяются по температурам в этих слоях. Значения парциальных давлений по слоям конструкции для периодов года отображены в таблице 5.

Таблица Г.5 – Парциальное давление насыщенного водяного пара

№ п/п слоя	Парциальное давление насыщенного водяного пара Е, Па		
	зима	лето	осень-весна
1	2231,1	2325,2	2250,2
2	2216,7	2323,3	2238,3
3	1678,3	2241,0	1783,0
4	1251,5	2159,9	1404,9
5	923,2	2081,4	1099,1
6	673,2	2005,4	853,4
7	471,8	1931,9	657,5

Параметры воздуха и водяного пара в воздушной прослойке отображены в таблице 6.

Таблица Г.6 – Параметры влагопередачи в прослойке

Параметр	Ед.изм.	Значение		
		зима	лето	весна-осень
Средняя температура воздуха в прослойке, t_{cp}	°C	- 5,3	15,8	- 0,98
Скорость движения воздуха в прослойке, V_{pr}	м/с	0,448	0,157	0,415
Расход воздуха в прослойке, j	кг/с	0,0355	0,0115	0,0322
Предельное парциальное давление водяного пара в прослойке, $e_{b,p}$	Па	475,8	1224,7	653,46
Среднее парциальное давление водяного пара в прослойке, e_{cp}	Па	433,81	1223	627,7
Парциальное давление водяного пара в конце прослойки, e_l	Па	475,8	1225	653,46
Предельное парциальное давление воздуха в прослойке, $E_{b,p}$	Па	390	1795,8	562,4

Графики распределения парциального давления по слоям конструкции изображены на рисунках 2 – 3. На графиках видно, что плоскость возможной конденсации в конструкции отсутствует, т.е. конденсации влаги возможна в самой воздушной прослойке навесного фасада. Как видно из таблицы 6,

конденсация влаги в прослойке происходит в зимний и осенне-весенний периоды, т.к. $e_l > E_{v.p.}$.

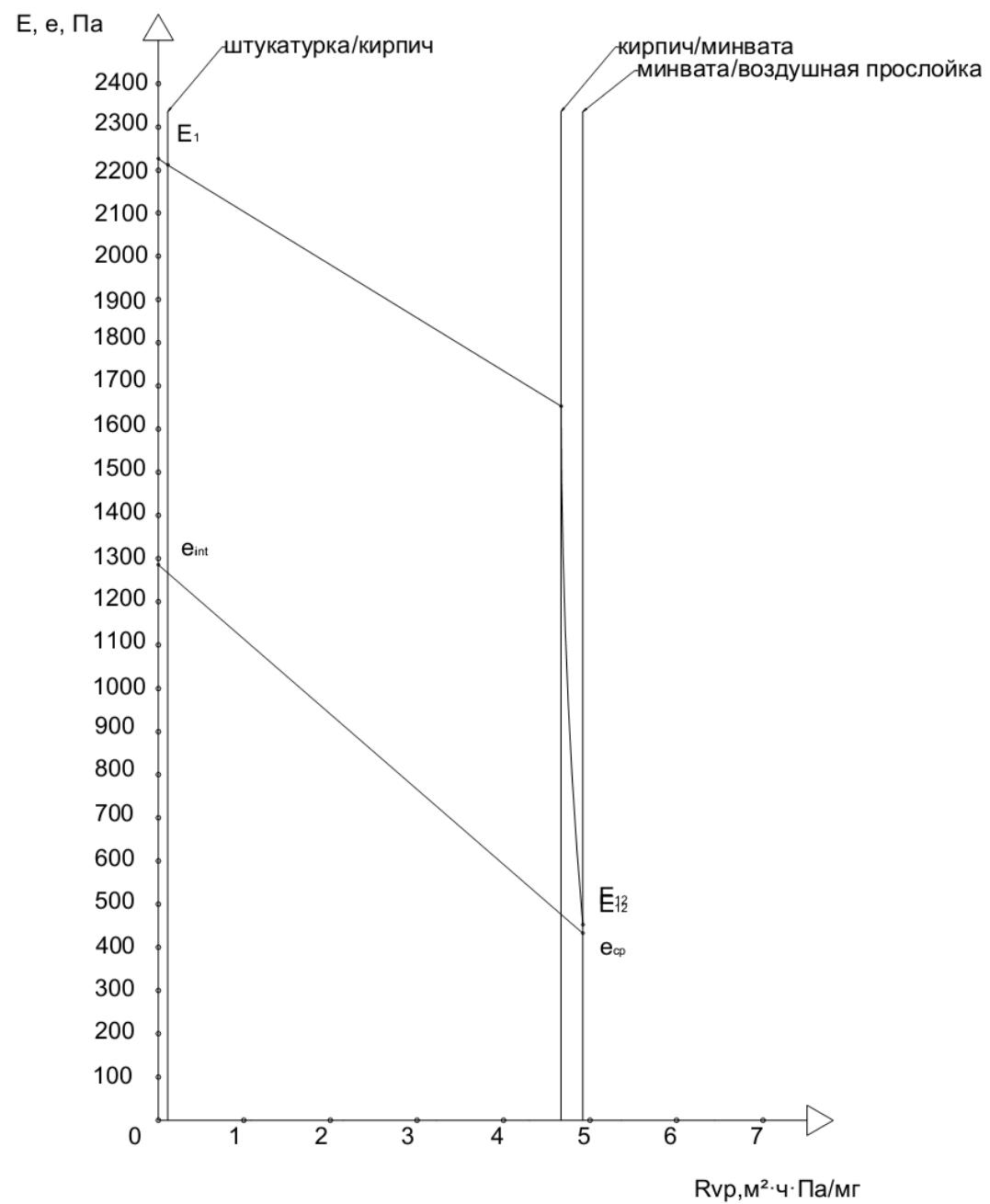


Рисунок Г.2 –Парциальное давление по слоям конструкции (зима).

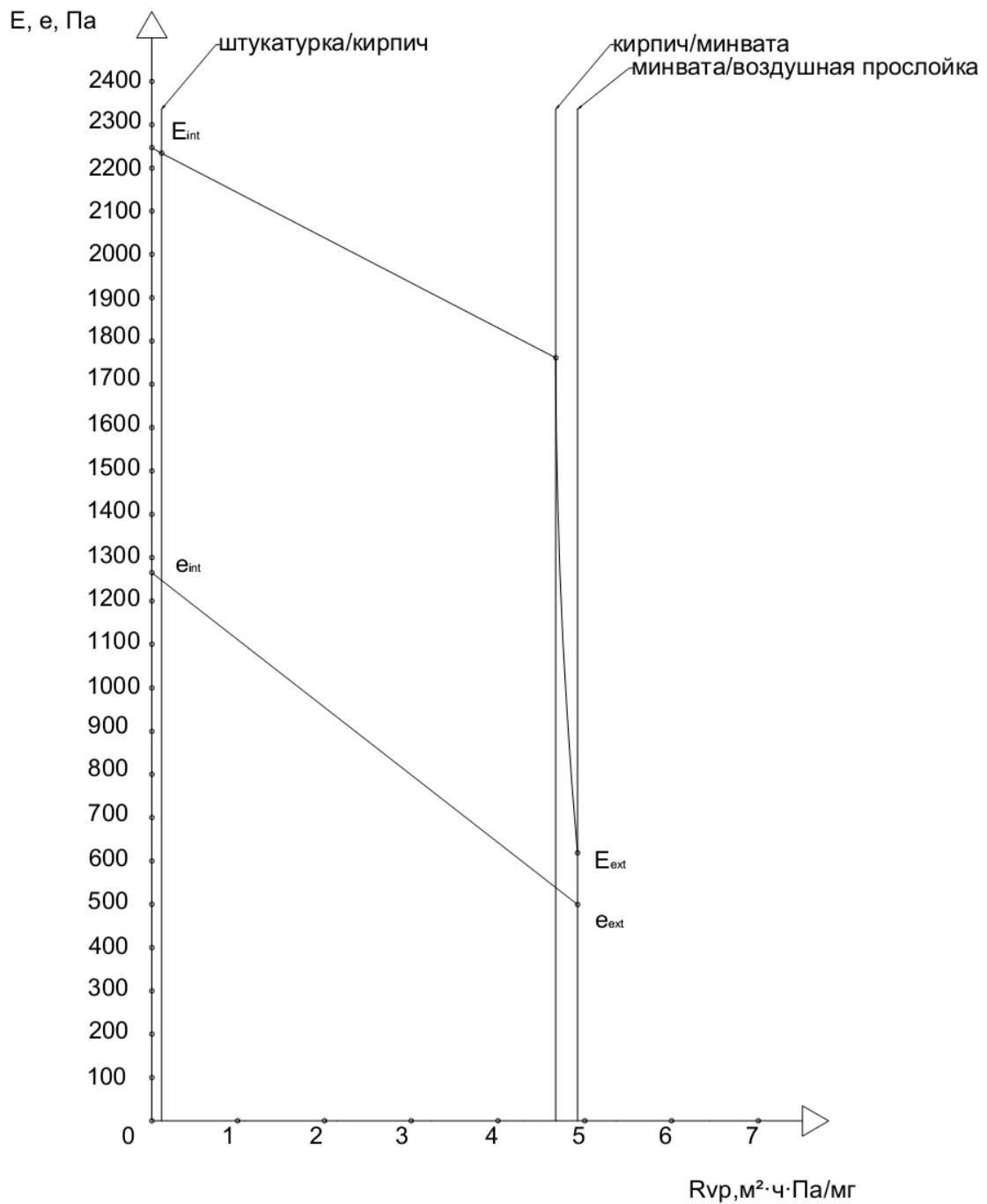


Рисунок Г.3 – Парциальное давление по слоям конструкции (осень-весна).

ПРИЛОЖЕНИЕ Д
Планирование эксперимента

Таблица Д.1 - Матрица эксперимента (факторы)

№ точки плана	Факторы											
	X_1	X_2	X_3	X_1^2	X_2^2	X_3^2	$(X_1')^2$	$(X_2')^2$	$(X_3')^2$	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	1	1	0	1	1	0	0,33	0,33	-0,7	1	0	0
2	-1	1	0	1	1	0	0,33	0,33	-0,7	-1	0	0
3	1	-1	0	1	1	0	0,33	0,33	-0,7	-1	0	0
4	-1	-1	0	1	1	0	0,33	0,33	-0,7	1	0	0
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
5	0	1	0	0	1	0	-0,67	0,33	-0,7	0	0	0
6	1	0	0	1	0	0	0,33	-0,67	-0,7	0	0	0
7	0	-1	0	0	1	0	-0,67	0,33	-0,7	0	0	0
8	-1	0	0	1	0	0	0,33	-0,67	-0,7	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	-0,67	-0,67	-0,7	0	0	0
10	1	1	1	1	1	1	0,33	0,33	0,33	1	1	1
11	-1	1	1	1	1	1	0,33	0,33	0,33	-1	-1	1
12	1	-1	1	1	1	1	0,33	0,33	0,33	-1	1	-1
13	-1	-1	1	1	1	1	0,33	0,33	0,33	1	-1	-1
14	0	1	1	0	1	1	-0,67	0,33	0,33	0	0	1
15	1	0	1	1	0	1	0,33	-0,67	0,33	0	1	0
16	0	-1	1	0	1	1	-0,67	0,33	0,33	0	0	-1
17	-1	0	1	1	0	1	0,33	-0,67	0,33	0	-1	0
18	0	0	1	0	0	1	-0,67	-0,67	0,33	0	0	0
19	1	1	-1	1	1	1	0,33	0,33	0,33	1	-1	-1
20	-1	1	-1	1	1	1	0,33	0,33	0,33	-1	1	-1
21	1	-1	-1	1	1	1	0,33	0,33	0,33	-1	-1	1
22	-1	-1	-1	1	1	1	0,33	0,33	0,33	1	1	1
23	0	1	-1	0	1	1	-0,67	0,33	0,33	0	0	-1
24	1	0	-1	1	0	1	0,33	-0,67	0,33	0	-1	0
25	0	-1	-1	0	1	1	-0,67	0,33	0,33	0	0	1
26	-1	0	-1	1	0	1	0,33	-0,67	0,33	0	1	0
27	0	0	-1	0	0	1	-0,67	-0,67	0,33	0	0	0

Таблица Д.2 - Матрица эксперимента (выходные параметры)

Выходной параметр											
№	h, м	d, м	Δt, °C	t _{cp}	v, $\text{м}^2/\text{с} \cdot 10^6$	λ · 10 ² BT/(м ² ·°C)	Pr	Gr	Gr · Pr, 10^{-8}	Nu	Y _i (a _k)
1	2	2,80	30,25	32,75	16,264	2,695	0,70045	29309420614	205,30	389,93	5,254
2	2	2,80	27,75	32,75	16,264	2,695	0,70045	26887154448	188,33	376,18	5,069
3	0,5	2,80	30,25	32	16,192	2,688	0,70060	463177125,4	3,25	69,45	3,734
4	0,5	2,80	27,75	32	16,192	2,688	0,70060	424898024,1	2,98	67,01	3,602
5	2	2,80	29,00	32,75	16,264	2,695	0,70045	28098287531	196,81	383,14	5,163
6	1,25	2,80	30,25	32,25	16,264	2,695	0,70045	7167335428	50,20	217,04	4,679
7	0,5	2,80	29,00	32	16,192	2,688	0,70060	444037574,8	3,11	68,25	3,669
8	1,25	2,80	27,75	32,25	16,216	2,69	0,70055	6613975747	46,33	209,92	4,517
9	1,25	2,80	29,00	32,25	16,216	2,69	0,70055	6911902583	48,42	213,80	4,601
10	2	5,10	30,25	32,5	16,24	2,693	0,70050	29420157389	206,09	390,55	5,259
11	2	5,10	27,75	32,5	16,24	2,693	0,70050	26988739423	189,06	376,78	5,073
12	0,5	5,10	30,25	32	16,192	2,688	0,70060	463177125,4	3,25	69,45	3,734
13	0,5	5,10	27,75	32	16,192	2,688	0,70060	424898024,1	2,98	67,01	3,602

14	2	5,10	29,00	32,5	16,24	2,693	0,70050	28204448406	197,57	383,75	5,167
15	1,25	5,10	30,25	32,5	16,24	2,693	0,70050	7182655612	50,31	217,24	4,680
16	0,5	5,10	29,00	32	16,192	2,688	0,70060	444037574,8	3,11	68,25	3,669
17	1,25	5,10	27,75	32,5	16,24	2,693	0,70050	6589047711	46,16	209,58	4,515
18	1,25	5,10	29,00	32,5	16,24	2,693	0,70050	6885851662	48,24	213,46	4,599
19	2	0,50	30,25	33,25	16,312	2,699	0,70035	29089633873	203,73	388,68	5,245
20	2	0,50	27,75	33,25	16,312	2,699	0,70035	26685531900	186,89	374,98	5,060
21	0,5	0,50	30,25	32,25	16,216	2,69	0,70055	461429082,8	3,23	69,34	3,731
22	0,5	0,50	27,75	32,25	16,216	2,69	0,70055	423294447,8	2,97	66,90	3,599
23	2	0,50	29,00	33,25	16,216	2,699	0,70035	28218753656	197,63	383,80	5,179
24	1,25	0,50	30,25	32,5	16,24	2,693	0,70050	7182655612	50,31	217,24	4,680
25	0,5	0,50	29,00	32,25	16,216	2,69	0,70055	442361765,3	3,10	68,14	3,666
26	1,25	0,50	27,75	32,5	16,24	2,693	0,70050	6589047711	46,16	209,58	4,515
27	1,25	0,50	29,00	32,5	16,24	2,693	0,70050	6885851662	48,24	213,46	4,599

Таблица Д.3 - Результаты перемножения

№	Выходной параметр	Результаты перемножения									
		$Y_i(a_k)$	$X_1 \cdot Y_i$	$X_2 \cdot Y_i$	$X_3 \cdot Y_i$	$(X_1')^2 \cdot Y_i$	$(X_2')^2 \cdot Y_i$	$(X_3')^2 \cdot Y_i$	$X_1 X_2 \cdot Y_i$	$X_1 X_3 \cdot Y_i$	$X_2 X_3 \cdot Y_i$
1	5,254	5,254	5,254	0,000	1,751	1,751	-3,503	5,254	0,000	0,000	
2	5,069	-5,069	5,069	0,000	1,690	1,690	-3,379	-5,069	0,000	0,000	
3	3,734	3,734	-3,734	0,000	1,245	1,245	-2,489	-3,734	0,000	0,000	
4	3,602	-3,602	-3,602	0,000	1,201	1,201	-2,401	3,602	0,000	0,000	
5	5,163	0,000	5,163	0,000	-3,442	1,721	-3,442	0,000	0,000	0,000	
6	4,679	4,679	0,000	0,000	1,560	-3,120	-3,120	0,000	0,000	0,000	
7	3,669	0,000	-3,669	0,000	-2,446	1,223	-2,446	0,000	0,000	0,000	
8	4,517	-4,517	0,000	0,000	1,506	-3,012	-3,012	0,000	0,000	0,000	
9	4,601	0,000	0,000	0,000	-3,067	-3,067	-3,067	0,000	0,000	0,000	
10	5,259	5,259	5,259	5,259	1,753	1,753	1,753	5,259	5,259	5,259	
11	5,073	-5,073	5,073	5,073	1,691	1,691	1,691	-5,073	-5,073	5,073	
12	3,734	3,734	-3,734	3,734	1,245	1,245	1,245	-3,734	3,734	-3,734	
13	3,602	-3,602	-3,602	3,602	1,201	1,201	1,201	3,602	-3,602	-3,602	

14	5,167	0,000	5,167	5,167	-3,445	1,722	1,722	0,000	0,000	5,167
15	4,680	4,680	0,000	4,680	1,560	-3,120	1,560	0,000	4,680	0,000
16	3,669	0,000	-3,669	3,669	-2,446	1,223	1,223	0,000	0,000	-3,669
17	4,515	-4,515	0,000	4,515	1,505	-3,010	1,505	0,000	-4,515	0,000
18	4,599	0,000	0,000	4,599	-3,066	-3,066	1,533	0,000	0,000	0,000
19	5,245	5,245	5,245	-5,245	1,748	1,748	1,748	5,245	-5,245	-5,245
20	5,060	-5,060	5,060	-5,060	1,687	1,687	1,687	-5,060	5,060	-5,060
21	3,731	3,731	-3,731	-3,731	1,244	1,244	1,244	-3,731	-3,731	3,731
22	3,599	-3,599	-3,599	-3,599	1,200	1,200	1,200	3,599	3,599	3,599
23	5,179	0,000	5,179	-5,179	-3,453	1,726	1,726	0,000	0,000	-5,179
24	4,680	4,680	0,000	-4,680	1,560	-3,120	1,560	0,000	-4,680	0,000
25	3,666	0,000	-3,666	-3,666	-2,444	1,222	1,222	0,000	0,000	3,666
26	4,515	-4,515	0,000	-4,515	1,505	-3,010	1,505	0,000	4,515	0,000
27	4,599	0,000	0,000	-4,599	-3,066	-3,066	1,533	0,000	0,000	0,000
Σ	120,862	1,442	13,465	0,024	-0,024	-1,099	-0,001	0,161	0,001	0,005

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Коэффициенты теплотехнической однородности различных конструкций Кирпичная стенка толщиной 500 мм

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

Акт внедрения в ТЕ ДПИ НИИ «Теплоэлектропроект» РП «Энергия Донбасс»



РЕСПУБЛИКАНСКОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ

Юридический адрес
Фактический адрес
Телефон
E-mail

ул. Щорса, д. 87, г. Донецк, 83114, ДНР
пр-т Титова, д. 8-б, г. Донецк, ДНР, 83048
071 346 98 42
deko@tep.don.energy

ТЕХНИЧЕСКАЯ ЕДИНИЦА ДОНЕЦКИЙ ПРОЕКТНО-ИЗЫСКАТЕЛЬСКИЙ И НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
«ТЕПЛОЭЛЕКТРОПРОЕКТ» РЕСПУБЛИКАНСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ «ЭНЕРГИЯ ДОНБАССА»

Исх. № 01-2445 от 27.11.2019.

На № _____ от _____

Диссертационный совет Д01.005.01
при ГОУ ВПО «Донбасская
национальная академия
строительства и архитектуры»

СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы
Копейки Дениса Вадимовича
на тему «**Повышение эффективности использования теплоизоляционных
материалов при утеплении ограждающих конструкций зданий**»,
представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по
специальности 05.23.03 – теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха,
газоснабжение и освещение

Результаты диссертационных исследований Копейки Дениса Вадимовича, а именно, методики определения теплотехнической и экономической эффективности модернизации ограждающих конструкций зданий за счет усовершенствования тепловой изоляции, методика оценки параметров теплового комфорта в помещении после утепления наружных стен, методика определения параметров влагопередачи в конструкциях с воздушными прослойками могут быть приняты к использованию для выполнения ряда проектов, связанных с модернизацией ограждающих конструкций зданий.

Использование предложенных методик позволит повысить эффективность энергосберегающих мероприятий по усовершенствованию теплой защиты зданий и может быть рекомендовано для широкого использования.

Директор
ТЕ ДПИ НИИ «Теплоэлектропроект»
РП «Энергия Донбасса»

Начальник ОКП-1

М.Е. Журавлев

С.И. Шакин





**ДОНЕЦКАЯ НАРОДНАЯ РЕСПУБЛИКА
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
"ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ"**

283001, г. Донецк, ул. Артема, 58 тел.: (062) 337-17-33, 335-75-62, факс: (062) 304-12-78
эл. почта: donntu.info@mail.ru

19.02.20 № 29 - 8/16

На № _____

СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы

Копейки Дениса Вадимовича

на тему «**Повышение эффективности использования теплоизоляционных материалов при утеплении ограждающих конструкций зданий**»,

представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.03 – теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение в учебный процесс

Донецкого национального технического университета

Результаты диссертационного исследования Копейки Дениса Вадимовича, а именно, методики оценки влияния дополнительного теплоизоляционного слоя на характеристики ограждающих конструкций зданий и на внутреннюю температуру воздуха в помещении, методика анализа параметров теплового комфорта в помещении, внедрены в учебный процесс подготовки бакалавров по направлению 22.03.02 «Металлургия», профиль Промышленная теплотехника в качестве учебного материала в курсе дисциплины «Источники теплоснабжения и тепловые сети», что отражено в рабочей программе указанной дисциплины.

Первый проректор
ГОУВПО «Донецкий Национальный
Технический Университет»

А.А. Каракозов

(подпись)

Начальник учебного отдела



Б.В. Гавриленко

(подпись)

Заведующий кафедрой
технической теплофизики

А.Б. Бирюков

(подпись)

М.П.