

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Хакасский технический институт – филиал СФУ  
институт

Строительство  
кафедра

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой  
\_\_\_\_\_ Г.Н., Шибаета  
подпись                      инициалы, фамилия  
« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019г.

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Анализ и регулирование теплопередачи ограждающих конструкций зданий  
при нестационарных условиях в программном комплексе Elcut

тема

08.04.01 Строительство  
код и наименование направления

08.04.01.03 Теория и проектирование зданий и сооружений  
код и наименование магистерской программы

Научный руководитель	_____	<u>к.т.н., доцент</u>	<u>Д.Г.Портнягин</u>
	подпись, дата	должность, ученая степень	инициалы, фамилия
Выпускник	_____		<u>И.В.Герасимова</u>
	подпись, дата		инициалы, фамилия
Рецензент		<u>ген. директор</u>	
	_____	<u>"Техремсервис"</u>	<u>Р.В. Минюхин</u>
	подпись, дата	должность, ученая степень	инициалы, фамилия
Нормоконтролер	_____	<u>к.т.н., доцент</u>	<u>Г.Н. Шибаета</u>
	подпись, дата	должность, ученая степень	инициалы, фамилия

Абакан 2019

## Содержание

Введение .....	5
1. Современное состояние вопроса минимизации теплопередачи ограждающих конструкций зданий при стационарных и нестационарных условиях.....	9
1.1 Современное состояние вопроса нормирования теплопередачи ограждающих конструкций .....	9
1.2 Анализ литературных источников .....	11
1.3 Влияние нестационарных факторов на формирование мостиков холода .....	15
1.3.1 Погодные и климатические условия как фактор влияния на энергоэффективность ограждающих конструкций здания .....	15
1.3.2 Влияние ветра и солнечной радиации на энергоэффективность ограждающих конструкций .....	17
1.3.3 Влияние температурно–влажностного состояния наружных ограждающих конструкций на эксплуатационные характеристики здания .....	18
1.3.4 Сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций как предпосылка для разработки мер по минимизации теплопотерь здания при нестационарных условиях и их сравнение с стационарным режимом .....	19
1.4 Влияние стационарных факторов и условий на формирование мостиков холода.....	22
1.4.1 Тепловая эффективность зданий при наличии мостиков холода ...	23
1.4.2 Конструктивные решения и их влияние на теплопотери ограждающих конструкций .....	27
1.4.3 Архитектурные элементы ограждающих конструкций как мостик холода.....	31
2 Методы оценки теплопотерь через ограждающие конструкции при стационарном и нестационарном режимах.....	32
2.1 Метод тепловизионного контроля.....	32
2.2 Моделирование процесса теплопереноса в многослойных ограждающих конструкциях в программном комплексе Elcut.....	35
2.2.1 Метод конечных элементов .....	35
2.2.2 Принцип работы в программном комплексе Elcut .....	36
3 Разработка научно–технических основ энергомиминимизации теплопотерь здания вследствие устранения геометрических и конструктивных мостиков холода ограждающих конструкций с учетом влияния природных факторов.	39

3.1 Влияние природных факторов на конструктивные мостики холода ограждающих конструкций .....	39
3.2 Влияние комплекса погодных условий .....	49
3.3 Анализ эффективности теплозащиты существующих конструктивных решений и поиск факторов, влияющих на уровень теплозащиты выступающих архитектурных элементов и ограждающих конструкций при нестационарных условиях .....	53
3.4 Анализ плотности теплового потока и распределения температур в толще ограждающей конструкции с утеплением по внешнему контуру теплоизоляционным материалом при стационарных и нестационарных условиях .....	59
3.4.1 Анализ плотности теплового потока и распределения температур в толще ограждающей конструкции с утеплением по внешнему контуру минераловатными плитами при стационарных и нестационарных условиях .....	59
3.4.2 Анализ плотности теплового потока и распределения температур в толще ограждающей конструкции с утеплением по внешнему контуру пенополиуретаном при стационарных и нестационарных условиях .....	63
3.5 Расчет плотности теплового потока по существующей формуле с учетом влияния солнечной радиации на ограждающую конструкцию ..	68
3.6 Влияние скорости ветра на теплотехнические характеристики ограждающих конструкций .....	74
4 Оценка экономической эффективности теплоизоляции ограждающих конструкций гражданских зданий при нестационарных условиях в зависимости от изменения величины теплопроводности теплоизоляционного материала с учетом затрат на тепловую энергию .....	77
Список использованных источников .....	87

## Введение

При строительстве частных и многоквартирных домов приходится учитывать множество факторов и соблюдать большое количество строительных норм и стандартов. Разрабатываются объемно–планировочные решения здания с учетом функционального процесса, по результатам конструктивного расчета выбираются материал и поперечное сечение несущих конструкций. При этом, расчет сопротивления теплопередаче не менее важен, чем остальные. От него зависит не только микроклимат в доме, и экономия на энергоносителях, но и прочность, надежность конструкции.

Не менее важно сохранить эстетический облик здания, который будет гармонично вливаться в общую городскую среду.

Ограждающие конструкции имеют важную роль в остове здания, не только несущую, но и энергоэффективную.

В реальных условиях эксплуатации режим теплопередачи через ограждающие конструкции всегда оказывается нестационарным. Однако на практике в большинстве случаев рассматривается стационарный режим теплопередачи, характеризующийся постоянством во времени величины теплового потока и температуры ограждения.

Тем не менее, для решения ряда задач нестационарной теплопроводности и тепловой устойчивости существующие методы и методики имеют ряд существенных неудобств. Прежде всего, при наличии нескольких слоев в составе ограждающих конструкций, широко используемых при проектировании в настоящее время, для определения полей температур на каждой границе соответствующего слоя возникает необходимость сращивать решения, что приводит к излишнему усложнению расчетов. При этом непосредственный вклад каждого слоя далеко не очевиден. Имеют место также известные проблемы с

заданием граничных условий. Кроме прочего, выводы некоторых формул при решении задач нестационарной теплопередачи настолько масштабны, что их использование для инженерных расчетов затруднительно. Данный ряд проблем нивелируется за счет использования программного комплекса Elcut.

В условиях увеличивающихся требований к теплозащите особое внимание уделяется такому понятию как «мостики холода». Так, в зависимости от уровня теплоизоляции и конструкции соединяющих деталей, через мостики холода здание может терять до половины передаваемой теплоты. При расчете потребности здания в тепловой энергии, воздействие мостиков холода может быть полностью определено с помощью корректирующих коэффициентов мостиков холода и учтено при выборе размеров отопительных установок [19]. Во избежание риска уже при планировании и возведении зданий необходимо детально изучить все мостики холода и их воздействие, которое можно устранить с помощью соответствующих конструктивных мер, например, направленной теплоизоляцией мостиков холода [8].

Для того чтобы объективно оценить эффективность ограждающей конструкции в отношении теплопотерь здания, недостаточно воспользоваться формулами для их расчета. Аргументируется это следующим.

Во-первых, исследование эффективности ограждающих конструкций необходимо проводить в нестационарных условиях, т.к. в каждом регионе погодные и климатические условия имеют разный характер и агрессивность. Особенности этих условий дают предпосылки для выявления зависимости теплопотерь через ограждающие конструкции с учетом погодных и климатических условий, изменяющихся во времени.

Во-вторых, существующие формулы для расчета теплопотерь в стационарных условиях через ограждающие конструкции не учитывают влияние погодных и климатических условий. Программный комплекс Elcut

позволяет задать нужные исходные данные (граничные условия) для расчета теплопотерь через ограждающие конструкции.

**Актуальность** связана с анализом и разработкой способов устранения теплопотерь через ограждающие конструкции здания при нестационарных условиях с сохранением эстетического восприятия здания.

**Цель работы** – разработка научно–технических основ энергоминимизации теплопотерь здания вследствие устранения геометрических и конструктивных мостиков холода ограждающих конструкций с учетом влияния природных факторов: солнечной радиации, скорости ветра, относительной влажности воздуха, осадков в Республике Хакасия.

#### **Задачи:**

1. Проведение анализа эффективности теплозащиты существующих конструктивных решений и поиск факторов, влияющих на уровень теплозащиты выступающих архитектурных элементов и ограждающих конструкций при нестационарных условиях
2. Анализ конструктивных решений, минимизирующих теплопотери ограждающих конструкций
3. Тепловизионный мониторинг в течение отопительного периода с целью выявить зависимость теплопотерь в нестационарных условиях от внешних условий среды
4. Анализ плотности теплового потока и распределения температур в толще ограждающей конструкции с утеплением при стационарных и нестационарных условиях в программном комплексе Elcut
5. Расчет экономической эффективности рассчитанных вариантов теплоизоляции конструктивных узлов ограждающих конструкций

**Объект исследования** – ограждающие конструкции, в том числе архитектурные элементы гражданских зданий (эркеры, балконы, пояски и т.д.)

**Предмет исследования** – тепловой поток ограждающих конструкций зданий.

**Практическая значимость:**

– проанализированы методы оценки экономической эффективности возведения наружных стен гражданских зданий с учетом затрат на тепловую энергию;

– определена зависимость плотности теплового потока ограждающей конструкции от погодных условий;

– определена экономическая целесообразность применения теплоизоляционных материалов для ограждающих конструкций зданий при нестационарных условиях;

– рассчитаны затраты на отопление зданий с применением существующих теплоизоляционных материалов ограждающих конструкций при нестационарном режиме

**Научная новизна:**

– выведена зависимость теплотерь здания при нестационарных условиях от теплового потока внутри и снаружи ограждающей конструкции, с учетом погодных и климатических факторов на территории Республика Хакасия;

– впервые проведена оценка экономической эффективности теплоизоляции ограждающих конструкций гражданских зданий при нестационарных условиях в зависимости от изменения величины теплопроводности теплоизоляционного материала с учетом затрат на тепловую энергию

# **1. Современное состояние вопроса минимизации теплопередачи ограждающих конструкций зданий при стационарных и нестационарных условиях**

## **1.1 Современное состояние вопроса нормирования теплопередачи ограждающих конструкций**

Энерго и ресурсосбережение является задачей мирового масштаба, решением которой ученые, проектировщики и эксплуатационники занимаются на протяжении многих лет. За рубежом улучшение теплозащиты эксплуатируемых зданий возникло как следствие энергетического кризиса 70х годов.

В нашей стране уровень тепловой защиты здания наружными стенами оставался почти без изменений до 1994 года. Он определялся нормированием величины сопротивления теплопередаче  $R_0$ , которое было основано на принципах обеспечения санитарногигиенических требований внутри помещения и ограничения теплопотерь в отопительный период при минимуме приведенных затрат на возведение ограждения и его эксплуатацию. Поэтому, при проектировании наружного ограждения должны были соблюдаться два условия:

- сопротивление теплопередаче  $R_0$  во всех случаях должно быть не менее требуемого по санитарногигиеническим условиям сопротивления теплопередаче  $R_{0тр}$ ;
- сопротивление теплопередаче ограждения  $R_0$  принимается равным экономически целесообразному сопротивлению  $R_{0эк}$ , определяемому из условия обеспечения наименьших приведенных затрат.

Выполнение расчетов по определению  $R_0^{эк}$  связано с большим объемом работ и затрат времени на вычисление и определение исходных величин и, поэтому, производилось редко. Для упрощения расчетов, следуя

указаниям Госстроя СССР, к величинам требуемых сопротивлений теплопередаче  $R_0^{TP}$  вводили повышающие коэффициенты. Они принимались в зависимости от назначения здания, его капитальности, возможностей заказчика и других экономических и социальных факторов. Величина коэффициентов колебалась от 1,1 до 2,0.

При определении экономически целесообразного сопротивления теплопередаче  $R_0^{ЭК}$  учитывались потери тепла за счет инфильтрации воздуха, стоимость тепловой энергии, стоимость материала теплоизоляционного слоя многослойной конструкции, отпускные цены на ограждающие конструкции, стоимость их транспортирования и монтажа.

Как показала практика, даже небольшие ошибки, допускаемые при конструировании, изготовлении, монтаже и эксплуатации ограждающих конструкций вели к понижению температуры на внутренней поверхности стен ниже допустимой, что зачастую приводило к выпадению конденсата.

Такой принцип нормирования и допускаемые ошибки привели к тому, что в среднем по стране на  $1 \text{ м}^2$  отопления общей площади жилого здания необходимо порядка 88 кг условного топлива в год, что превышает аналогичный показатель в странах, находящихся в сопоставимых с Россией климатических условиях в 2,5–3 раза [13].

Согласно современным нормам, приведенное сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций следует принимать не менее требуемых значений  $R_0^{TP}$ , определяемых исходя из условий энергосбережения, а так же санитарно–гигиенических и комфортных условий. Величина требуемого сопротивления теплопередаче стен, определяемая из условий энергосбережения по значению градусо–суток отопительного периода (ГСОП), больше величины, определяемой исходя из санитарно–гигиенических и комфортных требований. Это привело к тому, что в настоящее время нормируемая величина сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций определяется средней

температурой наружного воздуха и продолжительностью отопительного периода.

Изменения в подходе к нормированию сказываются на распределении  $R_0^{TP}$  по районам РФ. С целью сопоставления изменений сопротивления теплопередаче построены карты его распределения для наружных стен на территории России до и после 1996 г.

Нужно отметить, что мероприятия по дополнительной теплозащите стен в стране приобретают районный характер. Это говорит о том, что для создания оптимальных конструктивно – технологические решений теплозащиты стен зданий необходимо учитывать районы, в которых будут проводиться работы по утеплению стен. Причем, на каждый район должны иметься свои конструктивно – технологические решения теплозащиты.

Изменение в нормировании теплозащитных качеств ограждающих конструкций должно дать значительный эффект в экономии энергетических ресурсов, идущих на отопление зданий. Но это будет достигнуто лишь в том случае, если появятся совершенно новые конструктивные и технологические решения наружных стен, приспособленные не только к климатическим условиям, но и к строительной базе.

## **1.2 Анализ литературных источников**

Значительный вклад в решение теоретических и практических вопросов энергоэффективности и ограждающих конструкций внесли следующие ученые: Горшков А.С., Гагарин В.Г., Самарин О.Д., Бутовский И.Н., Ефименко М.Н., Табунщиков Ю.А., Езерский В.А., Монастырев П.В., Клычников Р.Ю. и многие другие.

В статье [1] для различных уровней тепловой защиты многоквартирного жилого здания с помощью формул был произведен расчет трансмиссионных потерь тепловой энергии на отопление. На основании этого расчета был произведен анализ потерь тепловой энергии через оболочку здания, экономически сопоставлены затраты на отопление зданий

с различным уровнем теплоизоляции ограждающих конструкций. По итогам исследования, автором статьи было выявлено, что чем выше уровень теплоизоляции ограждающих конструкций здания, тем меньше оказываются потери тепловой энергии на его отопление в течение отопительного периода. Повышение требований к нормам уровня тепловой защиты для ограждающих конструкций [2] представлено в качестве примера, где жители рассматриваемого в статье 25-этажного многоквартирного здания в первый год эксплуатации будут платить на 547 550 рублей больше по сравнению с жителями здания, построенного по минимальным требованиям [3], и на 1 612 100 рубль больше по сравнению с жителями здания, построенного по минимальным требованиям к уровню тепловой защиты (теплоизоляции) из стандарта Финляндии (National Building Code of Finland, Part D3) [4]. Из этого следует, что вопрос повышения качества теплоизоляции ограждающих конструкций стоит остро.

Большинство современных мер, направленных на повышение теплотехнических характеристик окон, фасадов и ограждающих конструкций, необходимость которых вытекает из мировых тенденций энергосбережения в строительной отрасли [5], относятся к «пассивным» методам, которые по многим оценкам являются в настоящее время экономически нецелесообразными, но и затраты на обеспечение существующих и проектируемых зданий системой «активного» энергосбережения остаются открытым вопросом, так как внедрение новых технологий не изучено на достаточном уровне. По данным профессора В. Гагарина и Ассоциации навесных фасадных систем (АНФАС) [6], для зданий выше трех этажей стоимость применения теплоизоляции толщиной больше 150 мм резко возрастает, что касается также ограждающих конструкций, исполненных в виде архитектурных элементов.

В своей работе Т.С. Егорова [7] изучает вопрос повышения энергоэффективности зданий благодаря устранению мостиков холода и непрерывной изоляции выступающих конструкций с применением системы

SchockIsokorb, сутью которого является устройство закладного узла, состоящего из материала Neopor для стыковки железобетонных плит с железобетонными перекрытиями. Однако, проведенный в статье анализ эффективности данного метода рассчитан для стационарных условий, не учитывающий перемены климатических и погодных условий.

Краткий анализ источников литературы по теме диссертационной работы представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Анализ состояния исследований по теме работы

Автор	Наименование работы	Результаты исследования
Ю.А. Матросов статья	Энергоэффективность и экология – основа современных требований к теплозащите зданий	Повышение энергоэффективности зданий может быть путем более интенсивного использования существующих технологий, таких как теплоизоляция, строительные материалы с высокой отражающей способностью, пассивное использование солнечной энергии [8].
М.С. Кононова, Е.Ю. Сороченкова, Н.Н. Смирнова статья	Исследование тепlopоступлений от солнечной радиации для жилых зданий в зависимости от ориентации по сторонам света	Уменьшение бытовых тепlopоступлений за счет тепlopоступлений от солнечной радиации [9].
Т.Е. Гордеева, Д.В. Зеленцов статья	Улучшение тепловлажностного режима жилого помещения	Рассматривается один из видов перепланировки жилых квартир. Рассмотрена ситуация, при которой необходимо введение в конструкцию наружной многослойной стены дополнительного утепления со стороны внутренних помещений [10].
Л. А. Голованова	Основные аспекты территориального энергосбережения	Изучение энергоактивных зданий, использующих энергию природной среды, которая фильтрует и распределяет доступную природную энергию во внутреннее пространство помещений в соответствии с нуждами потребителей [11].
П.П. Коваленко, Л.Н. Орлова	Городская климатология	Рассмотрение климатических условий территории России с целью комфортного микроклимата внутри здания или сооружения [12].

Окончание таблицы 1

Автор	Наименование работы	Результаты исследования
П.В. Монастырев	Физико–технические и конструктивно–технологические основы термомодернизации ограждающих конструкций жилых зданий (на примере центрально–черноземного региона)	Расчет разности теплопотерь и вычисление годовой стоимости сэкономленной тепловой энергии [13].
В.В. Иванов, С.А. Тихомиров	Нестационарные процессы теплопереноса через ограждающие конструкции	Влияние климатических условий на процессы теплопереноса через ограждающие конструкции [14].
Журнал «Энергетическая политика»	Основные положения энергетической стратегии России на период до 2020 года	Зависимость уровня теплоизоляции и конструкции соединяющих деталей, с учетом потенциальных мостиков холода [15].
М.С. Кононова	Исследование влияния некоторых геометрических параметров зданий на их теплоэнергетические показатели	Выявлена зависимость теплоэнергетических показателей от геометрических параметров здания [16].

Анализируя работы, которые были проведены по теме магистерской диссертации можно сделать вывод, что нестационарные условия эксплуатации здания изучены недостаточно, не изучено поведение теплофизических характеристик теплоизоляционного материала ограждающей конструкции с учетом погодных условий.

### **1.3 Влияние нестационарных факторов на формирование мостиков холода**

#### **1.3.1 Погодные и климатические условия как фактор влияния на энергоэффективность ограждающих конструкций здания**

Статистическая обработка многолетнего мониторинга климата как совокупности зависимых (или независимых) данных показывает, что в каждой местности для отдельных характерных периодов времени имеет место свой метеорологический градиент, оказывающий направленное воздействие на формирование теплового баланса различно ориентированных помещений, так что в результате совокупного действия ветра, солнечной радиации и температуры различно ориентированные помещения имеют существенно отличающиеся теплопотери или теплопоступления.

Климат местности выступает как совокупность данных для нестационарных условий, в многолетнем разрезе – режим погоды, обусловленный взаимодействием геофизических процессов глобального масштаба (солнечная радиация, теплооборот и влагооборот у земной поверхности, воздушная циркуляция и т.д.) с местными условиями и факторами географической среды (географическая широта, ландшафт территории, высота над уровнем моря, характер почвы и т.п.) [12].

Климат разных территорий России значительно отличается по многим характеристикам. Многолетние наблюдения комплексного сочетания в пространстве средних значений температуры, относительной влажности и скорости ветра легли в основу климатического районирования, согласно которому Россия расположена в трех климатических районах. В пределах каждого климатического района к зданиям предъявляются определенные типологические требования (планировка квартир, ориентация, устройство входов и т.д.), учитывающие местные условия строительства. Особое

внимание уделяется проектированию систем искусственного регулирования микроклимата, а именно предусмотрено центральное отопление повышенной мощности, что является основным источником энергопотребления в здании.

При этом предполагается достижение главной цели – снижение затрат энергии на эксплуатацию зданий. В каждом климатическом районе с этой целью используют различные конструктивные, архитектурные и объемно–планировочные решения. На основе метео статистики в Республике Хакасия можно проанализировать и спрогнозировать энергоэффективность ограждающих конструкции под влиянием солнечной радиации, ветра, осадков, температуры и влажности воздуха.

Теплоэнергетическое воздействие наружного климата на тепловой баланс здания может быть оптимизировано за счет выбора формы здания, расположения и площади заполнения световых проемов, регулирования фильтрационных потоков, а также может быть урегулировано за счет дополнительного утепления ограждающих конструкций, либо замены существующего теплоизоляционного материала на более эффективный.

При дополнительном утеплении однородная конструкция стен превращается в многослойную, что повышает требования к качеству проектирования и производства работ, поскольку разнородность и значительное количество применяемых материалов усугубляет возможность ошибок, приводящих к снижению теплозащитных свойств и эксплуатационной надежности утепляемых конструкций. В настоящее время дополнительное утепление существующих зданий осуществляется с использованием различных конструктивно–технологических решений и материалов. К сожалению, эти конструктивно–технологические решения часто принимаются без должного обоснования с позиции строительной теплофизики. Недостаточно внимания уделяется оценке надежности применяемых материалов и решений при реализации дополнительного утепления наружных стен. Слабо проработан инженерный вопрос проектирования отдельных систем дополнительного утепления уже

существующих зданий. При разработке конструктивных решений зачастую не увязываются с климатическими, материально–техническими и экономическими условиями отдельных регионов страны. Недостаточно проработаны организационно–технологические аспекты реализации дополнительного утепления с учетом состояния наружных стен существующих жилых зданий.

Между тем, именно на поверхностные слои наружных ограждений зданий климатические факторы оказывают максимальное воздействие. Накопление влаги в холодный период года в зоне резких колебаний температуры часто приводит к разрушению этого слоя.

В [17–18] описано влияние влагонакопления на микроклимат помещения и долговечность ограждающих конструкций на примере разных конструктивных решений наружных стен, которые заключаются в вариативности материалов теплоизоляционного слоя, применяемого в конструкциях, а также его расположение относительно внутренней и наружной поверхности помещения.

Большая площадь территории Республики Хакасия относится к климатическому району IV. Для первого климатического района характерно проектирование наружных ограждающих конструкции с высокими теплозащитными качествами и низкой воздухопроницаемостью.

Теплоэнергетическое воздействие солнечной радиации и ветра на различно ориентированные поверхности здания различно.

### **1.3.2 Влияние ветра и солнечной радиации на энергоэффективность ограждающих конструкций**

При проектировании для увеличения теплопоступлений от солнечной радиации в зимнее время необходимо увеличить площадь ограждений южной ориентации, так как в зимнее время на поверхность южной ориентации поступает тепла солнечной радиации даже больше, чем в летнее. Наружные ограждающие конструкции защищают помещение от

непосредственных атмосферных воздействий, а системы отопления и вентиляции поддерживают определенные параметры внутреннего климата. В общем случае можно считать, что влияние солнечной радиации на тепловой баланс помещения в холодный период года является положительным, а в теплый период года отрицательным. Влияние ветра, наоборот, в холодный период года является отрицательным, а в теплый период года это явление может быть в дневное время отрицательным, а в ночное – положительным.

Имеет смысл говорить об оптимизации влияния солнечной радиации и ветра на тепловой баланс здания. Возможно определить ориентацию и габариты здания, наиболее эффективного в тепловом отношении, то есть здания с минимальными теплопотерями в холодный период года и минимальными теплопоступлениями в теплый период года, за счет оптимального учета в тепловом балансе здания теплоэнергетического воздействия солнечной радиации и ветра на различно ориентированные поверхности.

### **1.3.3 Влияние температурно–влажностного состояния наружных ограждающих конструкций на эксплуатационные характеристики здания**

Долговечность поверхностных слоёв наружных ограждающих конструкций зависит от их температурно–влажностного состояния в холодный период года. В свою очередь, температурно–влажностное состояние наружных ограждающих конструкций зданий зависит от многих факторов. Прежде всего, от нестационарных климатических воздействий в холодный период года, а также от температуры и влажности воздуха внутри помещения, от свойств материалов из которых состоит конструкция, от расположения плотных и пористых слоёв конструкции по отношению к потокам тепла и влаги.

Промерзание характеризуется образованием конденсата водяного пара на внутренней поверхности стены. Конденсат оседает в виде капель, когда температура этой поверхности становится ниже точки росы, т. е. температуры образования конденсата пара, соответствующей данной относительной влажности воздуха. Промерзанию стен способствует увлажнение материала стены атмосферной влагой, приводящее к снижению теплоизоляционных свойств стены [11].

Чаще всего из-за усиленного обдувания промерзают углы зданий, а также стены и покрытия вдоль карнизов, перемычки. Промерзание покрытий, происходящее чаще всего вдоль карнизов вследствие недостаточной толщины утеплителя, приводит к подтаиванию снега и образованию наледей вдоль карнизов.

Промерзание ограждающих конструкций зданий приводит к отрицательным последствиям, главные из которых следующие:

1. Уменьшение термического сопротивления, обусловленное тем, что теплопроводность льда примерно в 3,5 раза больше теплопроводности воды;
2. Уменьшение воздухо- и паропроницаемости;
3. Снижение долговечности вследствие большого количества циклов «промерзание–оттаивание».

Недостаток данных о влиянии климатических и погодных условий на поведение конструктивных решений приводит зачастую к принятию неэффективных проектных вариантов зданий и сооружений.

#### **1.3.4 Сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций как предпосылка для разработки мер по минимизации теплотерь здания при нестационарных условиях и их сравнение с стационарным режимом**

Сопротивление теплопередаче строительных конструкций является одним из основных параметров, влияющих на тепловые потери зданий. В эксплуатируемых зданиях величины сопротивления теплопередаче могут

значительно отличаться от проектируемых из-за действия множества факторов, оказывающих внешнее воздействие на ограждающие конструкции.

При рассмотрении стационарного режима значительно упрощаются уравнения, что делает их практичными при разработке инженерных методик расчета, но этот метод не является объективным [19].

В работе [20] приведен пример уравнения сопротивления теплопередаче в стационарных условиях, указывая на надежность расчета, но слишком большую его трудоёмкость, так как измерения требуют длительного наблюдения. Также, данный метод расчета ограничивает область его применения и значительно снижает точность получаемых результатов.

$$R = \frac{T_B^{BH} - T_{CT}^{BH}}{Q} + \frac{T_{CT}^{BH} - T_{CT}^H}{Q} + \frac{T_{CT}^H - T_B^H}{Q}, \text{ где} \quad (1.1)$$

$T_B^{BH}$  – температура воздуха внутри помещения,  $T_{CT}^{BH}$  – температура поверхности стены внутри помещения,  $T_{CT}^H$  – температура поверхности стены снаружи здания,  $T_B^H$  – температура воздуха снаружи здания,  $Q$  – плотность теплового потока

В способе теплового контроля сопротивления теплопередаче многослойной конструкции в нестационарных условиях теплопередачи, включающем тепловизионное обследование одной из поверхностей исследуемого объекта, сравнение теоретических и полученных измерением результатов и выбор для дальнейших расчетов значения теплопроводности из числа заданных, которое может обеспечить условия сравнения, перед тепловизионным обследованием конструкции определяют время тепловой инерции теплопередачи, а также дискретность разрешения тепловизора, исходя из минимального дефекта, тепловизионное обследование проводят путем измерения температурного поля  $T(x,y)$  поверхности с пространственным периодом (шагом –  $\Delta a$ ), определяемым размерами минимального дефекта конструкции:

$$\Delta a \leq \begin{cases} (0,2 \dots 0,3) \times \Delta x_{dmin}, & \text{если } x_{dmin} \leq y_{dmin} \\ (0,2 \dots 0,3) \times \Delta y_{dmin}, & \text{если } y_{dmin} \leq x_{dmin} \end{cases}, \quad (1.2)$$

где  $\Delta x_{dmin}, \Delta y_{dmin}$  – геометрические размеры минимального дефекта контролируемой конструкции,

Далее измеряют значения температуры  $T_n(t_i), T_b(t_i)$  на противоположных сторонах конструкции в области с координатами контура  $L(x, y)$  вблизи точки с координатами  $x_0, y_0$ , с временными интервалами  $\tau_n$  и  $\tau_{bn}$ , соответственно, в течение интервалов времени:

а) на наружной поверхности  $\Delta \tau_{из}^{нар} = (0.. \Delta \tau_{из})$ , на внутренней поверхности  $\Delta \tau_{из}^{BH} = (\Delta \tau_{ин}.. (\Delta \tau_{ин} + \Delta \tau_{из}))$ ;

б) измеряют значения теплового потока на внутренней стороне конструкции  $q_b(t_j)$  с временным интервалом  $\tau_q$  последовательно во времени в течение интервала времени  $\Delta \tau_{из}^{BH} = (\Delta \tau_{ин}.. (\Delta \tau_{ин} + \Delta \tau_{из}))$ ;

– накапливают по каждому измерению значения температуры  $T_n(t_i), T_b(t_i)$  на противоположных сторонах конструкции и значения теплового потока  $q_b(t_j)$ ,

– определяют сопротивление теплопередаче ( $R$ ) многослойной конструкции в точке контролируемого участка поверхности исследуемого объекта с координатами  $(x_0, y_0)$ :

$$R(X_0, Y_0) = \frac{\left| \frac{1}{N_1} \sum_{i=0}^{i=N_1} \{T_b(t_i)\} - \frac{1}{N_2} \sum_{j=0}^{j=N_2} \{T_n(t_i)\} \right|}{\frac{1}{N_3} \sum_{i=0}^{i=N_3} \{q_b(t_k)\}}, \quad (1.3)$$

где  $N_1 =$  (целое число) от  $\Delta \tau_{из}^{BH} / \Delta \tau_{ТВ}$ ,

$N_2 =$  (целое число) от  $\Delta \tau_{из} / \Delta \tau_{ТН}$ ,

$N_3 =$  (целое число) от  $\Delta \tau_{из}^{BH} / \Delta \tau_q$ ,

$i, j, k$  – индексы суммирования, и определяют термическое сопротивление по всей поверхности исследуемого объекта в произвольных координатах  $(x, y)$ :

$$R(x, y) = aT(x, y) + b, \quad \text{где} \quad (1.4)$$

$$a = [R(x_{01}, y_{01}) - R(x_{02}, y_{02})] / [T(x_{01}, y_{01}) - T(x_{02}, y_{02})]$$

$$b = R(x_{01}, y_{01}) - aT(x_{01}, y_{01}).$$

На основании сравнения двух уравнений измерения сопротивления теплопередаче при стационарных и нестационарных условиях можно сделать вывод, что расчет по формулам очень объемный, требует больших затрат времени.

Для упрощения способа расчета теплопотерь через ограждающие конструкции можно воспользоваться программным комплексом Elcut, учитывающий нестационарный режим.

Исследование нацелено на получение экспериментальных данных, в ходе которого будет проверяться теория тепловых потоков в узлах ограждающих конструкций с учетом фактических нестационарных тепловлажностных режимов ограждающих конструкций, климатических воздействий и естественной деструкции теплоизоляционного материала.

Измерение температур в толще различных решений ограждающих конструкций заключается в необходимости определения реальной картины градиента температур по толщине ограждающих конструкций при условии изменчивости погодных и климатических условий.

#### **1.4 Влияние стационарных факторов и условий на формирование мостиков холода**

В холодный период года, температура в помещении значительно выше, чем температура наружного воздуха. Влага, накопившаяся за холодный период года в ограждающей конструкции должна высохнуть за теплый период года для обеспечения нормального влажностного режима ограждающей конструкции. В случае отсутствия такого высыхания часть влаги останется в ограждающей конструкции до следующего холодного периода. И таким образом, через несколько лет эксплуатации отдельные части ограждающей конструкции утратят свои теплоизоляционные свойства, произойдет промерзание и возможно частичное разрушение ограждающей конструкции. Для обеспечения нормального влажностного режима ограждающей конструкции необходимо, чтобы часть ограждающей

конструкции, расположенной между внутренней поверхностью и теплоизоляционным слоем имело сопротивление прохождению водяных паров через свою толщу в несколько раз больше, чем часть ограждающей конструкции, расположенной между наружной поверхностью и теплоизоляционным слоем.

Сопротивление прохождению водяных паров через толщу ограждения называется сопротивлением паропроницанию ограждающей конструкции, имеет размерность  $\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} / \text{мг}$  [2].

Согласно [2] защита от переувлажнения ограждающих конструкций должна обеспечиваться путем проектирования ограждающих конструкций с сопротивлением паропроницанию внутренних слоев не менее требуемого значения, определяемого расчетом одномерного влагопереноса (осуществляемому по механизму паропроницаемости).

Утеплитель может увлажняться значительно больше, его показатели могут превышать допустимые нормативные расчетные значения. Влага, находящаяся в "холодных" слоях утеплителя, может не удаляться в восходящий поток воздуха в вентилируемом зазоре вследствие малой влагоемкости воздуха. Максимальное увлажнение утеплителя может достигать значения величины водопоглощения. Избыточная влага будет вытекать из утеплителя и этот эффект можно наблюдать на некоторых фасадах в виде сосулек, свисающих из-под облицовки на верхних этажах, и отсыревших стен внутри помещения. При насыщении материала водой снижается его прочность, увеличиваются средняя плотность, теплопроводность, наблюдаются коррозионные процессы.

#### **1.4.1 Тепловая эффективность зданий при наличии мостиков холода**

С точки зрения теплопотерь, наименее энергозатратными являются здания простой прямоугольной формы, что делает их внешний облик обыденным и лишенным уникальности.

Согласно нормативным документам [2], теплотехнический расчет на практике выполняется для прямолинейного участка ограждающей конструкции. При этом не учитывается вероятность появления мостиков холода через архитектурные элементы ограждающих конструкций, а также через узлы примыкания выступающих архитектурных элементов (например, балкон, эркер, поясok) к основной части здания.

Мостик холода – участок ограждающей конструкции здания (окончание бетонного элемента, стыки стен и т. п.), имеющий пониженное термическое (сопротивление способность тела, его поверхности или какого–либо слоя препятствовать распространению теплового движения молекул). [7]. В области соединения строительных элементов и при определенных строительных конструкциях экзотермическая внешняя поверхность может с точки зрения геометрии быть в несколько раз больше внутренней термопоглощающей поверхности. Поэтому через эти строительные элементы на единицу площади поверхности конструкции проходит больше теплоты, в сравнении с другими конструкциями здания. В таких случаях говорят о геометрически обусловленных мостиках холода (рисунок 1). Повышенные тепловые потери через мостики холода приводит к ряду негативных последствий:

1. Возрастает потребление энергии для отопления здания
2. Наличие мостиков холода значительно снижает эффективность теплозащиты здания.
3. На боковой поверхности строительных элементов поверхностные температуры становятся ниже. При определенных обстоятельствах это может привести к образованию конденсата, накоплению влаги с последующим неизбежным появлением плесневого грибка, следствием чего являются строительные дефекты. Не исключается также возможность нанесения ущерба здоровью жильцов.

Различают несколько видов мостиков холода:

1. Геометрические

2. Конструктивные
3. Обусловленные видом используемых материалов
4. Линейные
5. Точечные

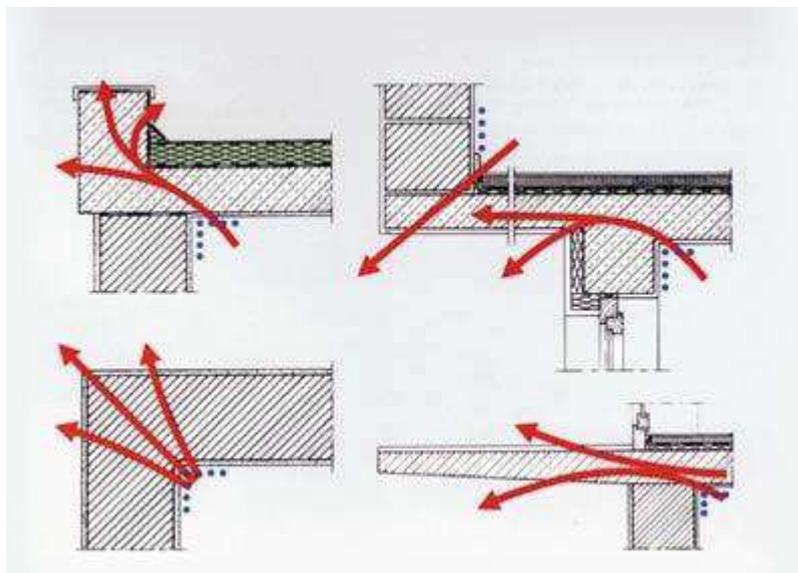


Рисунок 1 – Геометрические мостики холода

**Геометрические** мостики холода прежде всего встречаются в местах стыка элементов конструкции. Например, угол здания имеет гораздо худшие теплозащитные характеристики по сравнению с плоской стеной. На внутренней поверхности наружных стен в углах температура всегда ниже, ведь площадь наружной поверхности углов подверженной воздействию холодного уличного воздуха намного больше площади, контактирующей с теплым воздухом внутренней поверхности. Из-за этого холод с улицы проходит интенсивней в углах здания, понижая температуру стены со стороны теплого помещения. А на более холодных участках стены выпадает конденсат.

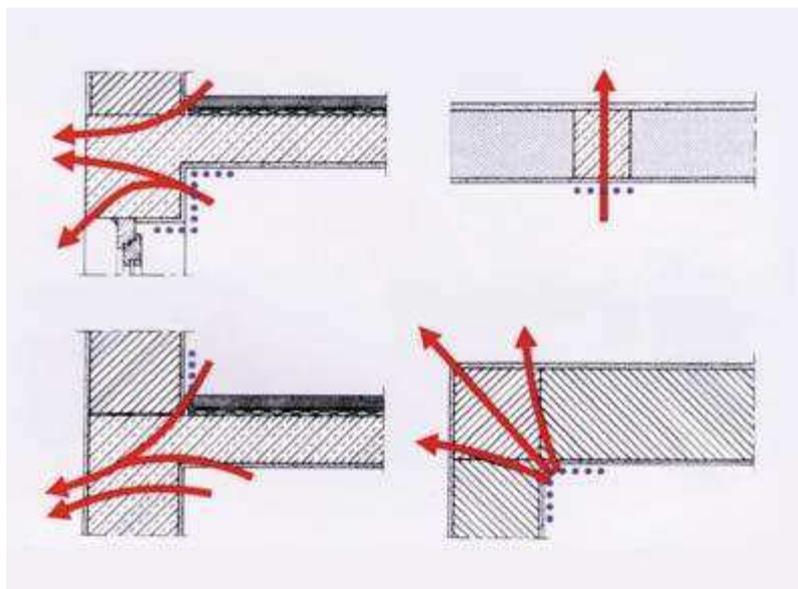


Рисунок 2 – Конструктивные мостики холода

**Конструктивные** мостики холода возникают вследствие разной теплопроводности конструкционных материалов. Примером тому являются строительные элементы из бетона в кирпичной или блочной кладке, например, несущие перекрытия, оконные и дверные перемычки, выступы, подвальные цоколи и так далее. Очень часто в строительной практике наслаиваются геометрические, конструкционные и материальные «мостики холода», что еще более усугубляет ситуацию с теплопотерями.

**Линейные** «мостики холода» вызываются прерывистостью слоя теплоизоляции, например, по длине откосов окон или балконных дверей и перемычек в области конструктивных узлов.

**Точечные** «мостики холода» вызываются различными крепежными элементами (подвески, анкеры, болты), а образуются такие мостики в местах установки телевизионных антенн, навесов и так далее.

Последствия, которые образуются при возникновении мостиков холода, сравнимы с эффектом не утепленной наружной стены длиной 4–6 м (зачастую это половина ширины дома). Действие мостика холода может распространяться до 1 м вглубь помещения, то есть отрицательные температуры в узлах конструкции возникают даже при положительных температурах внутри помещения. Это создает предпосылки для оптимизации

теплопотерь на стыке балконной плиты и плиты перекрытия.

Таким образом, устранение мостиков холода необходимо не только по энергетическим причинам, но и по причинам санитарно–гигиенического характера, связанным со здоровьем людей. Что касается строительных элементов, то устранение мостиков холода создает предпосылки для долгосрочного сохранения и функциональной надежности строений. Так, в зависимости от уровня теплоизоляции и конструкции соединяющих деталей, через мостики холода здание может терять до половины передаваемой теплоты. При расчете потребности здания в энергии воздействие мостиков холода может быть полностью определено с помощью корректирующих коэффициентов мостиков холода и учтено при выборе размеров отопительных установок. Во избежание риска уже при планировании и возведении зданий необходимо детально изучить все мостики холода и их воздействие, которое можно устранить с помощью соответствующих конструктивных мер, например, направленной теплоизоляцией мостиков холода. Визуально мостики холода обычно не определяются на фасаде здания. Только термографические исследования показывают теплотехнические дефекты.

Теплоизоляция ограждающих конструкций и ее отсутствие, выбор наиболее эффективного теплоизоляционного материала и конструктивного решения влияет на расчет теплопотерь и затраты на их устранение.

#### **1.4.2 Конструктивные решения и их влияние на теплопотери ограждающих конструкций**

Недостаток данных о полной энергоэффективности инженерных решений в строительном комплексе России приводит зачастую к принятию неэффективных проектных вариантов зданий и сооружений.

Технологический спрос энергии на отопление зданий формируется на стадии проектирования. Он зависит от структуры теплопотерь. Рассматриваемые в данной диссертационной работе теплопотери,

называются трансмиссионными, т. е. это такие тепловые потери, в результате которых через наружную оболочку здания исчезает до 30 % тепловой энергии.

Структура тепловых потерь здания не является постоянной. Она меняется в результате воздействия достаточно многих факторов, таких как назначение, этажность, ориентация и габариты здания, размеры и сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций и т.д. Достичь существенных результатов экономии энергии на стадии архитектурно-строительного проектирования представляется возможным только при комплексном учете всех перечисленных составляющих теплового баланса здания.

Перед проектировщиками, которые намерены улучшить энергетическую эффективность здания, при определении его формы стоят два основных вопроса о выборе типа здания – энергоэкономичного или энергоактивного.

Энергоактивные здания, использующие энергию природной среды, должны иметь форму, которая фильтрует и распределяет доступную природную энергию во внутреннее пространство помещений в соответствии с нуждами потребителей. Оптимальное использование природных условий заключается в сбалансированности вклада природной среды и искусственно создаваемого микроклимата. Наиболее эффективным архитектурным элементом является эркер. Включение этого архитектурного элемента в проект здания не подразумевает применения дорогостоящих технологий, материалов и узких специализированных знаний в области проектирования, однако создает не заурядный внешний вид для здания.

Требование обязательного повышения теплоэффективности ограждающих конструкций зданий при одновременном ограничении стоимости строительства привело к необходимости возведения многослойных стен с использованием в качестве утеплителя легких эффективных теплоизоляционных материалов. В настоящее время

существует достаточное количество зарубежных и отечественных технологий по возведению многослойных наружных стен и утеплению существующего строительного фонда. Эти технологии конструктивно похожи друг на друга, но отличаются типом утеплителя, системой армирования и крепления, составом и толщиной защитного слоя. Наиболее используемые методы повышения теплоизоляции представляют системы “Dryvit” (США), “Senergy” (США), “Тех-Color” (Германия), “Ceresit” (Польша), “теплоизолирующая оболочка “Тиги-Кнауф””, “Полиалпан”, “Термошуба” (Белоруссия), “Шуба плюс” (фирма “Эверест”), сухой способ утепления наружных стен (Академический институт инвестиционностроительных технологий РААСН).

Существенным фактором в этих конструктивных системах является последовательность расположения слоев разной плотности в многослойном ограждении. Размещение слоев сказывается на влажностном режиме, тепловой инерции, характере затухания амплитуды температурных колебаний в толще конструкции, а также на ее теплоаккумулирующих свойствах, которые учитываются и используются в пассивных системах энергоактивных зданий. Повысить энергоэффективность наружных стен в возводимых и эксплуатируемых зданиях можно путем их утепления с внутренней или с наружной стороны. Практическая реализация различных проектных разработок показала, что оба способа имеют позитивные и негативные стороны.

Для практического исследования по теме диссертации было рассмотрено распределение температур в ограждающей конструкции при положении слоя утеплителя снаружи и внутри ограждающей конструкции.

В работе [21] (рисунок 3) в первом варианте (слой утеплителя расположен снаружи кладки) отклонение значений температур на стыке слоя утеплителя ( $13,71^{\circ}\text{C}$ ) и поверхности кирпичной кладки внутри помещения ( $18,37^{\circ}\text{C}$ ) составляет  $4,66^{\circ}\text{C}$ . Таким образом, несущий слой всегда будет находиться в области положительных температур, а диапазон их

колебаний будет оставаться небольшим даже при больших амплитудах суточных и сезонных колебаний температуры наружного воздуха. Это уменьшает размер температурных деформаций в кладке и, следовательно, вероятность образования деформационных напряжений и трещин. Пологий наклон графика температур показывает, что при временном отключении систем отопления наружу будет отдаваться небольшое количество тепла, что обеспечит термостабильность внутренней среды помещения. За счет того, что кладка (несущий слой) даже при экстремальных похолоданиях будет находиться в области положительных температур, снижается вероятность образования конденсата и исключается возможность его замерзания в теле кладки несущей конструкции.

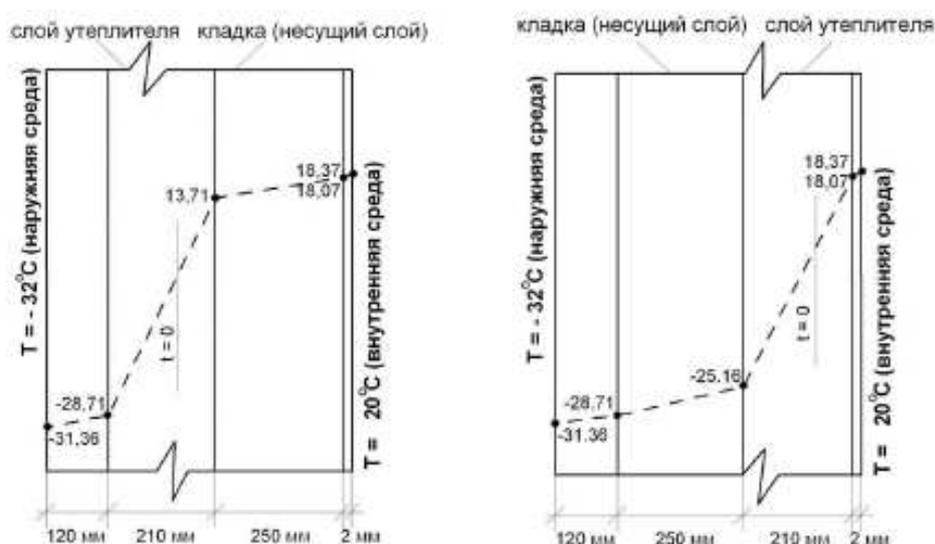


Рисунок 3 – Распределение температур в ограждающей конструкции при различных вариантах положения слоя утеплителя, 1 – слой утеплителя расположен снаружи кирпичной кладки, 2 – слой утеплителя расположен внутри кирпичной кладки

Во втором варианте, когда слой утеплителя расположен со стороны внутренней среды здания, температура в кладке в зимнее время будет находиться в области отрицательных температур. Таким образом, при резких изменениях температуры воздуха в годовом ходе, а также при резкой смене погодных условий (потепление, похолодание) кладка будет подвергаться воздействию больших температурных колебаний, что может привести к появлению в ней трещин от температурных деформаций. Кроме того, в

переходные сезоны года, когда в суточном ходе температура наружной среды переходит через 0°C, в кладке может накапливаться конденсат, а при положении нулевой изотермы внутри несущего слоя конструкции будет происходить его замерзание и, как следствие, появится возможность образования трещин, связанных с увеличением объема воды при превращении ее в лед (физическое выветривание) [25].

Утепление наружных стен с внутренней стороны плитным или рулонным утеплителем категорически недопустимо, поскольку такие решения вызывают ускоренное разрушение ограждающих конструкций за счёт их полного промерзания и расширения микротрещин и швов, а также приводят к образованию конденсата и, соответственно, к замачиванию стен, полов, электропроводки, элементов отделки и самого утеплителя.

### **1.4.3 Архитектурные элементы ограждающих конструкций как мостик холода**

В современном мире такие аспекты как эстетика и экономичность занимают важную нишу при проектировании зданий. Архитектурные формы и элементы решают задачу создания архитектурной выразительности здания. Выразительность зданию придают декоративные архитектурные элементы, такие как балконы, лоджии, эркеры, слуховые окна и др.

Архитекторы проектируют в домах балконы и эркеры, считая эти архитектурные элементы привлекательными и функциональными. Самым популярным решением, взятым за основу роли конструкции, воспринимающей нагрузку от стенового ограждения (например, эркер, выполненный кирпичной кладкой), является балконная железобетонная плита, работающая по типу консоли. Однако именно в этом месте возникает «мостик холода» большой протяженности.

## **2 Методы оценки теплопотерь через ограждающие конструкции при стационарном и нестационарном режимах**

### **2.1 Метод тепловизионного контроля**

В странах СНГ, США, Германии для контроля теплоизоляции строительных конструкций широко используется термография (тепловой метод неразрушающего контроля) [22]. В частности, этот метод получил достаточно широкое распространение в России, где принят ряд соответствующих правительственных постановлений, выпущены нормативные документы, разработаны методики и созданы центры по проведению термографических обследований зданий и сооружений [23–26].

Тепловизионный контроль качества теплозащиты зданий и сооружений используется для контроля состояния ограждающих конструкций по окончании строительства, а также в период эксплуатации. Он отличается оперативностью, наглядностью метода и достоверностью полученных результатов.

Метод позволяет выявить нарушения теплозащиты ограждающих конструкций, возникшие в результате следующих причин:

- 1) нарушение технологии изготовления строительных материалов, правил складирования, перевозки и т. п.;
- 2) ошибки и нарушения при строительстве зданий;
- 3) неправильный режим эксплуатации.

Перечисленные факторы приводят к преждевременному снижению теплозащитных свойств в отдельных местах ограждающих конструкций в результате воздействия погодных (ветер, атмосферные осадки) и естественно–климатических (циклы тепло–холод–тепло, влажность) условий. Это, в свою очередь, приводит к ухудшению микроклимата внутри зданий и перерасходу топлива. Необходимо заметить, что физическая сторона явлений, происходящих при излучении и распространении тепла

поверхностями ограждающих строительных конструкций, достаточно хорошо изучена и описана в литературе [27–28].

Термографию зданий и сооружений следует проводить в отопительный сезон, так как при этом перепад температур будет максимально возможным. Так как метод исследования проводится в нестационарных условиях, экспериментальные данные были получены в ходе мониторинга в течение нескольких суток, с возможностью отследить знакопеременность температуры воздуха и ее влияние на теплопотери через ограждающие конструкции зданий. Необходимо отсутствие осадков, поверхность обследуемых зданий должна быть свободна от инея. Условия тепловой инерции материалов конструкций при термографии наружной части здания требуют, чтобы обследуемый объект не находился на солнце в течение 12 часов, предшествующих съемке. Лучше проводить измерения утром, в пасмурную погоду. При инфракрасной съемке внутри помещений следует особое внимание обратить на экранирование источников света и тепла (ламп накаливания, отопительных радиаторов), расположенных вблизи объекта термографии.

При ветреной погоде необходимо осуществлять корректировку измеренных значений температур. По возможности следует выбирать безветренные дни. Сила и направление ветра оказывают существенное влияние на теплопотери воздухопроницанием и теплопотери конвекцией с наружной поверхности.

Все значения температур, определенных при помощи тепловизионного обследования, должны быть предварительно скорректированы с учетом излучательной способности объекта. Большинство современных тепловизоров делают эту коррекцию автоматически, достаточно ввести значение излучательной способности измеряемой поверхности.

По известным удельным тепловым потокам через аномальные участки вычисляют полный тепловой поток, путем умножения на площадь этого участка. Полученное значение позволяет определить избыточные

теплопотери за счет наличия участков с повышенными теплопотерями, перерасход топлива, и в итоге – экономический ущерб.

Приведенная выше методика не учитывает теплопотери воздухопроницаемостью. Определить теплопотери воздухопроницаемостью через ограждающие конструкции достаточно трудно. Данное явление связано с переносом вещества. Таким образом, в настоящее время достоверно возможно определить только теплопотери через ограждающие конструкции за счет теплового потока. Эти теплопотери будут несколько меньше действительных из-за теплопотери воздухопроницаемостью.

При практической термографии следует иметь в виду, что участки с повышенным воздухопроницаемостью – это предельный случай участка с повышенными теплопотерями, когда термическое сопротивление равно нулю. Процесс воздухопроницаемости зависит от разности давлений, температур, ориентации здания относительно сторон света, направления и силы ветра. При обследовании здания важно выявить такие места, что легко осуществляется при тепловизионной съемке и ликвидировать их.

Конечной целью термографического обследования является определение сопротивления теплопередаче наружных ограждающих конструкций, а также оценка их энергоэффективности. Для ее достижения согласно действующим в России методикам [29–30] необходимо получение достаточно большого объема экспериментальных данных, включающих в себя не только результаты собственно термографирования, но и результаты измерения тепловых потоков через здания, температуры внутри помещений, скорости ветра, а также других климатических условий. В качестве измерительной аппаратуры используется не только тепловизор, но и целый ряд других устройств (самопишущие датчики температуры, измерители тепловых потоков и т. д.). Такой всеобъемлющий подход позволяет в итоге определить качество теплоизоляции стен здания с достаточно высокой точностью (погрешность до 15 %), но является достаточно трудоемким и дорогостоящим [31].

Учитывая важность получения достоверной информации о температурных режимах ограждений и то, что процесс теплообмена в многослойных стенках с утеплителем изучен недостаточно, были проведены численные эксперименты для нескольких ограждающих конструкций. Определялись температуры конструкций и плотности тепловых потоков на наружной и внутренней поверхностях.

Однако, обследование ограждающих конструкций зданий с помощью тепловизионной съемки дает ограниченный ряд данных для исследования влияния погодных и климатических условий на энергоэффективность ограждающей конструкции в нестационарных условиях.

С целью подробного изучения влияния погодных и климатических факторов на теплопотери ограждающих конструкций имеющих архитектурную выразительность нужно обработать и преобразовать данные, полученные в ходе мониторинга ограждающих конструкций здания с помощью тепловизионной съемки, для этого будет проведен расчет по формулам и сравнительный расчет в программном комплексе Elcut при нестационарных условиях.

## **2.2 Моделирование процесса теплопереноса в многослойных ограждающих конструкциях в программном комплексе Elcut**

Elcut – это комплекс программ для инженерного моделирования электромагнитных, тепловых и механических задач методом конечных элементов.

### **2.2.1 Метод конечных элементов**

Метод конечных элементов (МКЭ) – один из наиболее гибких и универсальных методов решения широкого круга задач теплообмена. Отличие МКЭ от конечно–разностного метода Эйлера заключается в том, что в выбранном конечном элементе функция не обязательно заменяется

линейной зависимостью, а может быть принята в виде полинома (многочлена).

Суть метода заключена в его названии. Область, в которой ищется решение дифференциальных уравнений, разбивается на конечное количество подобластей (элементов). В каждом из элементов произвольно выбирается вид аппроксимирующей функции. В простейшем случае это полином первой степени. Вне своего элемента аппроксимирующая функция равна нулю. Значения функций на границах элементов (в узлах) являются решением задачи и заранее неизвестны. Коэффициенты аппроксимирующих функций обычно ищутся из условия равенства значения соседних функций на границах между элементами (в узлах). Затем эти коэффициенты выражаются через значения функций в узлах элементов. Составляется система линейных алгебраических уравнений. Количество уравнений равно количеству неизвестных значений в узлах, на которых ищется решение исходной системы, прямо пропорционально количеству элементов и ограничивается только возможностями ЭВМ. Так как каждый из элементов связан с ограниченным количеством соседних, система линейных алгебраических уравнений имеет разреженный вид, что существенно упрощает её решение.

### **2.2.2 Принцип работы в программном комплексе Elcut**

Elcut позволяет выполнить линейный и нелинейный стационарный температурный расчет в плоской и осесимметричной постановке. Формулировка задачи основывается на стационарном уравнении теплопроводности с граничными условиями радиационного и конвективного теплообмена. При постановке задачи были использованы следующие возможности:

Свойства сред:

- ортотропные (независимые от механических и термических свойств, характеризуются разными свойствами вдоль трех взаимно

перпендикулярных направлений) материалы с постоянной теплопроводностью

- изотропные материалы с теплопроводностью, зависящей от температуры

- материалы с теплоемкостью, зависящей от температуры

Граничные условия:

- заданная температура
- заданный тепловой поток на границе
- условия радиационного и конвективного теплообмена
- поверхности с постоянной, заранее неизвестной температурой

Результаты расчета:

- температура
- градиент температуры
- плотность теплового потока и интегральные значения теплового потока через заданные поверхности.

При решении тепловых задач используется уравнение теплопроводности в одном из видов:

для линейных задач:

$$\frac{d}{dx} \left( \lambda_x \cdot \frac{dT}{dx} \right) + \frac{d}{dy} \left( \lambda_y \cdot \frac{dT}{dy} \right) = -q - c\rho \frac{dT}{dt} \text{ — в плоском случае,} \quad (2.1)$$

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( \lambda_r r \cdot \frac{dT}{dr} \right) + \frac{d}{dz} \left( \lambda_z \cdot \frac{dT}{dz} \right) = -q - c\rho \frac{dT}{dt} \text{ — в осесимметричном случае;} \quad (2.2)$$

для нелинейных задач:

$$\frac{d}{dx} \left( \lambda(T) \cdot \frac{dT}{dx} \right) + \frac{d}{dy} \left( \lambda(T) \cdot \frac{dT}{dy} \right) = -q(T) - c(T)\rho \frac{dT}{dt} \text{ — в плоском случае;} \quad (2.3)$$

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( \lambda(T)r \cdot \frac{dT}{dr} \right) + \frac{d}{dz} \left( \lambda(T) \cdot \frac{dT}{dz} \right) = -q(T) - c(T)\rho \frac{dT}{dt} \text{ — в осесимметричном} \quad (2.4)$$

случае, где

$T$  – температура,  $t$  – время,  $\lambda_x(y,z,r)$  – компоненты тензора теплопроводности (в линейной постановке),  $\lambda(T)$  – теплопроводность, как функция температуры, представленная кубическим сплайном (анизотропия не поддерживается в нелинейной постановке);

$q$  – удельная мощность тепловыделения, в линейной постановке – константа, в нелинейной постановке – задаваемая кубическим сплайном функция температуры;

$c(T)$  – удельная теплоемкость, в линейной постановке – константа, в нелинейной постановке – задаваемая кубическим сплайном функция температуры;  $\rho$  – плотность.

В стационарной задаче последнее слагаемое в правой части уравнений равно нулю. Все параметры уравнений в линейной постановке постоянны в пределах каждого блока модели.

Для нестационарной задачи: графики и таблицы изменения физической величины в зависимости от времени.

Можно передать распределение температуры в задачу нестационарной теплопередачи, где оно будет использовано в качестве начального распределения температуры.

Elcut позволяет задать источники тепла в блоках, ребрах или отдельных вершинах модели. Источник, заданный в конкретной точке плоскости  $x_y$ , описывает нагреватель в виде струны, следом которой служит данная точка плоскости, и задается мощностью тепловыделения на единицу длины.

Источник тепла, заданный на ребре модели, соответствует тепловыделяющей поверхности в трехмерном мире. Он характеризуется поверхностной плотностью тепловыделения и описывается при помощи граничного условия второго рода для ребра. Объемная плотность тепловыделения, заданная для блока модели, соответствует объемному источнику тепла. Граничные условия могут быть заданы на внешних и внутренних границах расчетной области.

Полученный обширный числовой материал будет использован для детального изучения картины нестационарного теплообмена, что позволит выявить некоторые качественные особенности процесса теплопереноса в ограждающих конструкциях. Представленные ниже результаты относятся к

условиям Республики Хакасия.

### **3 Разработка научно–технических основ энергоминимизации теплопотерь здания вследствие устранения геометрических и конструктивных мостиков холода ограждающих конструкций с учетом влияния природных факторов**

#### **3.1 Влияние природных факторов на конструктивные мостики холода ограждающих конструкций**

Положение слоя утеплителя в составе ограждающей конструкции играет важное значение в вопросе энергоэффективности. Оно выбирается исходя из функционального назначения и режима эксплуатации зданий и помещений. При этом должна обеспечиваться требуемая термостабильность внутренней среды помещений при минимальном потреблении энергоресурсов на их отопление и кондиционирование. Правильное расположение слоя утеплителя в составе ограждающей конструкции определяет долговечность и надежность ее эксплуатации. Для этого требуется предотвратить возможность образования и замерзания конденсата в жестких слоях ограждающей конструкции и обеспечить их минимальную температурную деформацию, обусловленную амплитудой колебания температуры наружного воздуха и других климатических параметров, определяющих условия эксплуатации ограждающей конструкции в течение всего года. Месторасположение теплоизоляционного слоя существенным образом отражается на величине тепловых потерь. В случае расположения теплоизоляционного слоя снаруживеличина  $q_{н.пов.}$  минимальна и практически постоянна.

С целью изучения влияния положения слоя утеплителя в ограждающей конструкции был проведен расчет плотности тепловых потоков и температур поверхности ограждающих конструкций в программном комплексе Elcut.

На рисунке 4 изображена схема распространения теплового потока в

толще ограждающей конструкции здания, выполненной из кирпича без дополнительной теплоизоляции. В таблице 2 представлены полученные данные с помощью программного комплекса Elcut.

Вариант 1.

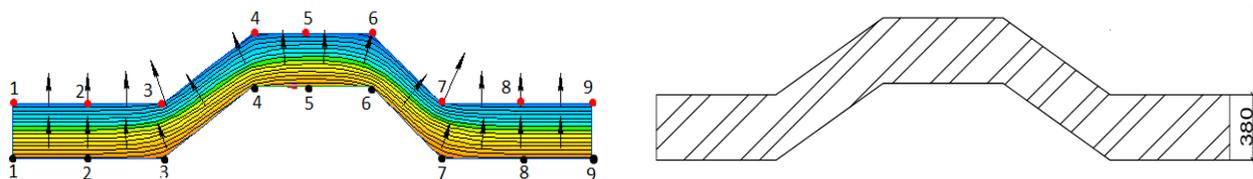


Рисунок 4 – Схема распределения температуры по наружной и внутренней поверхности здания и теплового потока в кирпичной стене без утеплителя

Таблица 2 – Плотность теплового потока и температура поверхности ограждающей конструкции без утеплителя снаружи и внутри здания

№ точки	Тепловой поток внутри здания, Вт/м <sup>2</sup>	Температура поверхности внутри здания, °С	Тепловой поток снаружи здания, Вт/м <sup>2</sup>	Температура поверхности снаружи здания, °С
1	103,77	7,7	103,86	-29,89
2	103,09	7,85	104,83	-30,44
3	72,9	11,58	168,88	-27,28
4	158,1	0,87	64,42	-32,2
5	153,55	4,65	131	-29,3
6	167,28	0,77	78,44	-32,73
7	68,6	11,94	135,05	-26,44
8	102,56	8,21	105	-30,44
9	103,76	8,07	103,88	-30,48
Среднее значение	114,85	6,85	110,59	-29,9

На рисунке 5 изображена схема распространения теплового потока в толще ограждающей конструкции здания, выполненной из кирпича с наружным утеплением пенополистеролом. В таблице 3 представлены полученные данные с помощью программного комплекса Elcut.

Вариант 2.

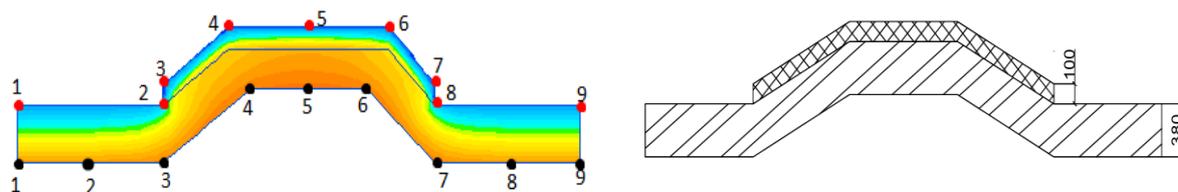


Рисунок 5 – Схема распределения температуры по наружной и внутренней поверхности здания и теплового потока в кирпичной стене с наружным утеплением (пенополистирол)

Таблица 3 – Плотность теплового потока и температура поверхности ограждающей конструкции снаружи и внутри здания с наружным утеплением (пенополистерол)

№ точки	Тепловой поток внутри здания, Вт/ м <sup>2</sup>	Температура поверхности внутри здания, °С	Тепловой поток снаружи здания, Вт/ м <sup>2</sup>	Температура поверхности снаружи здания, °С
1	90	9,25	91	-31
2	88,7	9,5	147	-22,7
3	61,7	12,6	5,75	-34
4	51,1	14	5,7	-34,75
5	35,34	15,9	15,88	-34,3
6	56,82	13,63	8,76	-34,75
7	51,68	13,86	2,36	-34,5
8	88,5	9,5	153,8	-21,46
9	90,2	9,38	91,4	-31
Среднее значение:	68,22	11,95	57,96	-30,9

Рассмотрим и проанализируем плотность теплового потока в узле примыкания утеплителя к кирпичной стене с последовательным увеличением величины захлеста утеплителя (пенополистерол) по контуру ограждающей конструкции на 10,20,40,80 см, таким образом вычислим оптимальную величину длины утеплителя по наружному контуру ограждающей

конструкции, в данном примере им является эркер.

На рисунке 6 изображена схема распространения теплового потока в толще ограждающей конструкции здания, выполненной из кирпича с наружным утеплением пенополистеролом с захлестом 10 см на поверхность стены. В таблице 4 представлены полученные данные с помощью программного комплекса Elcut.

Вариант 3.

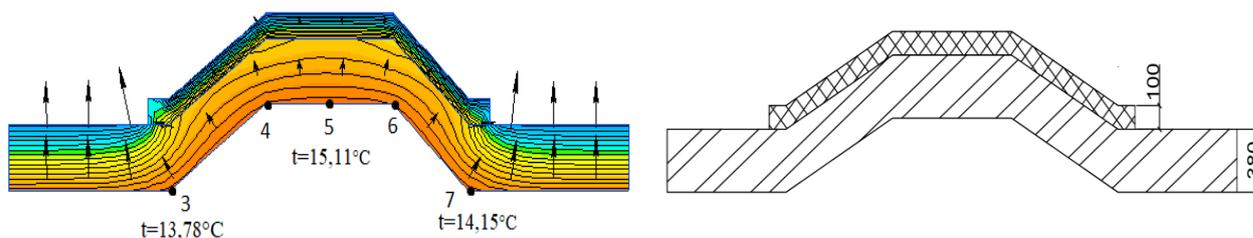


Рисунок 6 – Схема распределения температуры по наружной и внутренней поверхности здания и теплового потока в кирпичной стене с наружным утеплением (пенополистирол)

Таблица 4 – Плотность теплового потока и температура поверхности ограждающей конструкции снаружи и внутри здания с наружным утеплением (пенополистирол) с захлестом 10см

№ точки	Тепловой поток на стыке утеплителя с кирпичной стеной, Вт/м <sup>2</sup>	Температура поверхности на стыке утеплителя с кирпичной стеной, °С
3	44,03	14,97
4	54,11	13,78
5	41,84	15,11
6	56,68	13,28
7	41,88	15,15
Среднее значение	47,71	14,46

В узлах примыкания утеплителя к кирпичной стене, с захлестом по контуру кирпичной стены на 10 см, в точках 3–7 обнаружено уменьшение теплового потока и увеличение температуры поверхности по сравнению со схемой на рисунке 5. Плотность теплового потока уменьшилась на 8%, температура поверхности увеличилась на 10%, в сравнении с предыдущим вариантом утепления ограждающей конструкции по наружной поверхности без захлеста по поверхности стены.

На рисунке 7 изображена схема распространения теплового потока в толще ограждающей конструкции здания, выполненной из кирпича с наружным утеплением пенополистеролом с захлестом 20 см на поверхность стены. В таблице 5 представлены полученные данные с помощью программного комплекса Elcut.

#### Вариант 4.

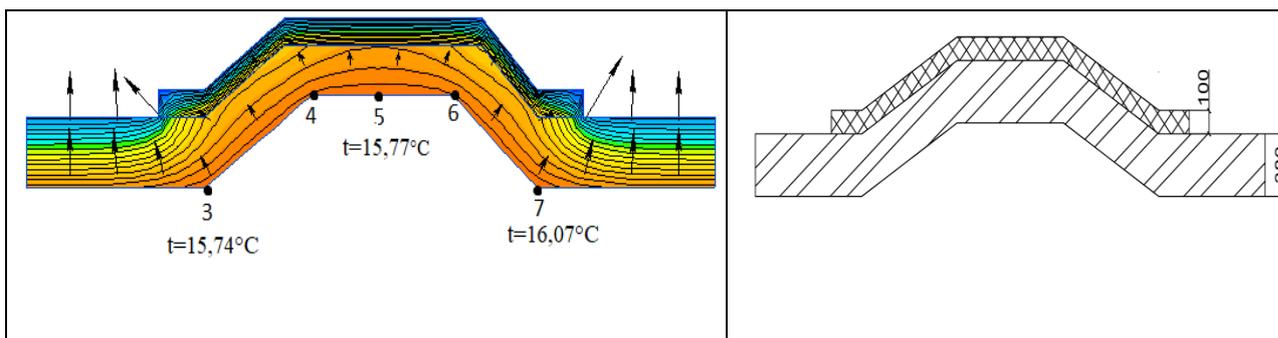


Рисунок 7 – Схема распределения температуры по наружной и внутренней поверхности здания и теплового потока в кирпичной стене с наружным утеплением (пенополистирол)

Таблица 5 – Плотность теплового потока и температура поверхности ограждающей конструкции снаружи и внутри здания с наружным утеплением (пенополистирол) с захлестом 20 см

№ точки	Тепловой поток на стыке утеплителя с кирпичной стеной, Вт/м <sup>2</sup>	Температура поверхности на стыке утеплителя с кирпичной стеной, °С
3	37,1	15,74
4	50	14,25

## Окончание таблицы 5

№ точки	Тепловой поток на стыке утеплителя с кирпичной стеной, Вт/м <sup>2</sup>	Температура поверхности на стыке утеплителя с кирпичной стеной, °С
5	35,62	15,77
6	53,37	14,77
7	34,11	16,07
Среднее значение	42,04	15,32

В узлах примыкания утеплителя к кирпичной стене, с захлестом по контуру кирпичной стены на 20 см, в точках 3–7 обнаружено уменьшение теплового потока и увеличение температуры поверхности. Плотность теплового потока уменьшилась на 12%, температура поверхности увеличилась на 3%, в сравнении с предыдущим вариантом.

На рисунке 8 изображена схема распространения теплового потока в толще ограждающей конструкции здания, выполненной из кирпича с наружным утеплением пенополистеролом с захлестом 40 см на поверхность стены. В таблице 6 представлены полученные данные с помощью программного комплекса Elcut.

### Вариант 5.

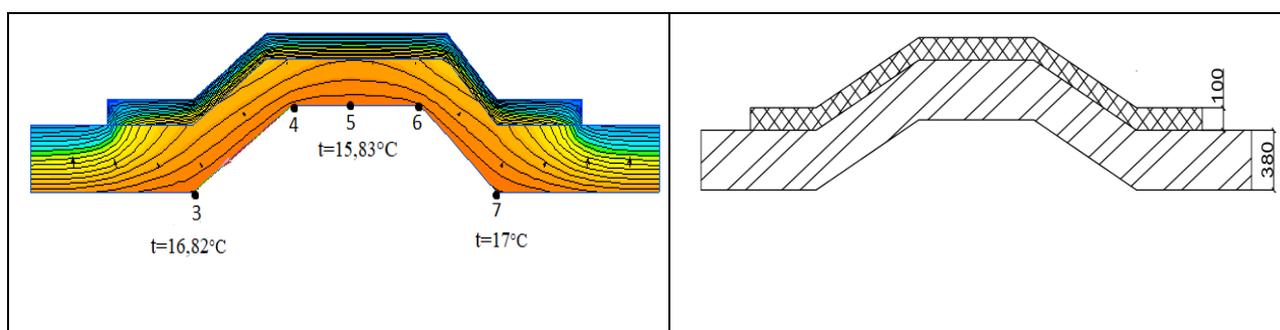


Рисунок 8 – Схема распределения температуры по наружной и внутренней поверхности здания и теплового потока в кирпичной стене с наружным утеплением (пенополистирол)

Таблица 6 – Плотность теплового потока и температура поверхности ограждающей конструкции снаружи и внутри здания с наружным утеплением (пенополистирол) с захлестом 40 см

№ точки	Тепловой поток на стыке утеплителя с кирпичной стеной, Вт/м <sup>2</sup>	Температура поверхности на стыке утеплителя с кирпичной стеной, °С
3	27,6	16,82
4	49,94	14,26
5	35,67	15,83
6	53	13,77
7	25	17
Среднее значение	38,24	15,54

В узлах примыкания утеплителя к кирпичной стене, с захлестом по контуру кирпичной стены на 40 см, в точках 3–7 обнаружено не существенное уменьшение теплового потока и увеличение температуры поверхности. Плотность теплового потока уменьшилась на 10%, температура поверхности увеличилась на 1,5%, в сравнении с предыдущим вариантом.

На рисунке 9 изображена схема распространения теплового потока в толще ограждающей конструкции здания, выполненной из кирпича с наружным утеплением пенополистеролом с захлестом 80 см на поверхность стены. В таблице 7 представлены полученные данные с помощью программного комплекса Elcut.

## Вариант 6.

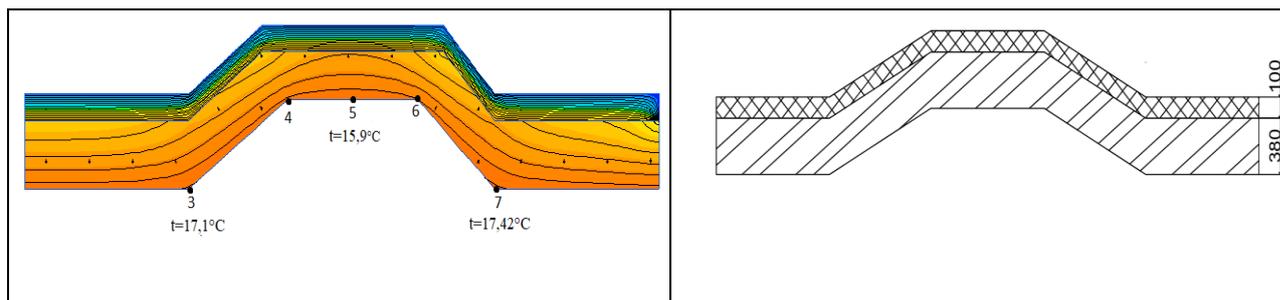


Рисунок 9 – Схема распределения температуры по наружной и внутренней поверхности здания и теплового потока в кирпичной стене с наружным утеплением (пенополистирол)

Таблица 7 – Плотность теплового потока и температура поверхности ограждающей конструкции снаружи и внутри здания с наружным утеплением (пенополистирол) с захлестом 80 см

№ точки	Тепловой поток на стыке утеплителя с кирпичной стеной, Вт/м <sup>2</sup>	Температура поверхности на стыке утеплителя с кирпичной стеной, °С
3	24,94	17,1
4	50,1	14,25
5	35,66	15,9
6	53,44	13,86
7	22,43	17,42
Среднее значение	37,31	15,71

В узлах примыкания утеплителя к кирпичной стене, с захлестом по контуру кирпичной стены на 80 см, в точках 3–7 обнаружено не существенное уменьшение теплового потока и увеличение температуры поверхности. Плотность теплового потока уменьшилась на 2,5%, температура поверхности увеличилась на 1%, в сравнении с предыдущим вариантом.

Вывод: проанализировав плотность теплового потока и температуру поверхности в узле примыкания утеплителя к кирпичной стене с последовательным увеличением величины захлеста утеплителя по контуру

ограждающей конструкции на 10,20,40,80 см, было обнаружено, что величина захлестане значительно влияет на вышеперечисленные показатели. Однако плотность теплового потока ограждающей конструкции с захлестом 40 см теплоизоляционного материала на поверхность оказалась на 30% меньше, чем в конструктивном решении теплоизоляции ограждающей конструкции снаружи без нахлеста на поверхность стены. Отсюда следует, что нет необходимости утеплять ограждающие конструкции по их длине.

На рисунке 10 изображена схема тепловых потоков ограждающей кирпичной конструкции по внутреннему контуру здания с внутренней теплоизоляцией пенополистиролом.

Вариант 7.

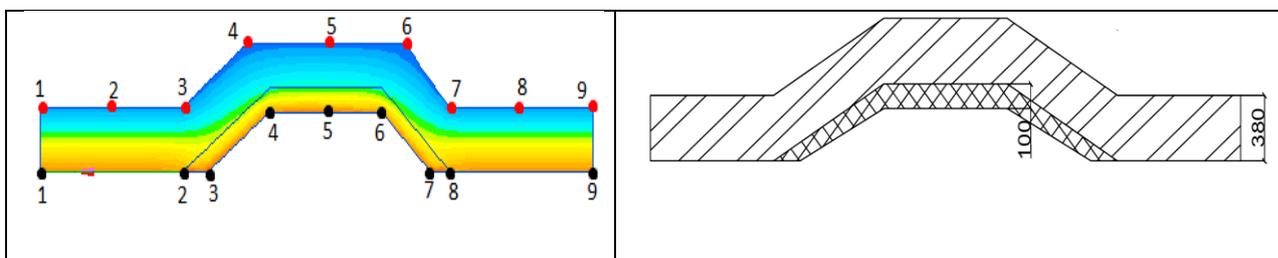


Рисунок 10 – Схема распределения температуры по наружной и внутренней поверхности здания и теплового потока в кирпичной стене с утеплителем внутри здания (пенополистирол)

Таблица 8 – Плотность теплового потока и температура поверхности ограждающей конструкции снаружи и внутри здания с внутренним утеплением (пенополистирол)

№ точки	Тепловой поток внутри здания, Вт/ м <sup>2</sup>	Температура поверхности внутри здания, °С	Тепловой поток снаружи здания, Вт/м <sup>2</sup>	Температура поверхности снаружи здания, °С
1	90	9	91,53	-30,5
2	97,87	7,6	91,9	-30,2
3	7	19,65	115	-29,8
4	98,4	8,45	31,96	-33,6

Окончание таблицы 8

№ точки	Тепловой поток внутри здания, Вт/ м <sup>2</sup>	Температура поверхности внутри здания, °С	Тепловой поток снаружи здания, Вт/м <sup>2</sup>	Температура поверхности снаружи здания, °С
5	48,35	13,4	59,55	-32,4
6	102	8	35,7	-33,9
7	3,45	19,58	94,15	-29,3
8	94,85	8	91,9	-31
9	90	9,55	91,5	-30,7
Среднее значение:	70,21	11,47	78,13	-31,26

Для наглядности все данные сведены в единый график (рисунок 11).

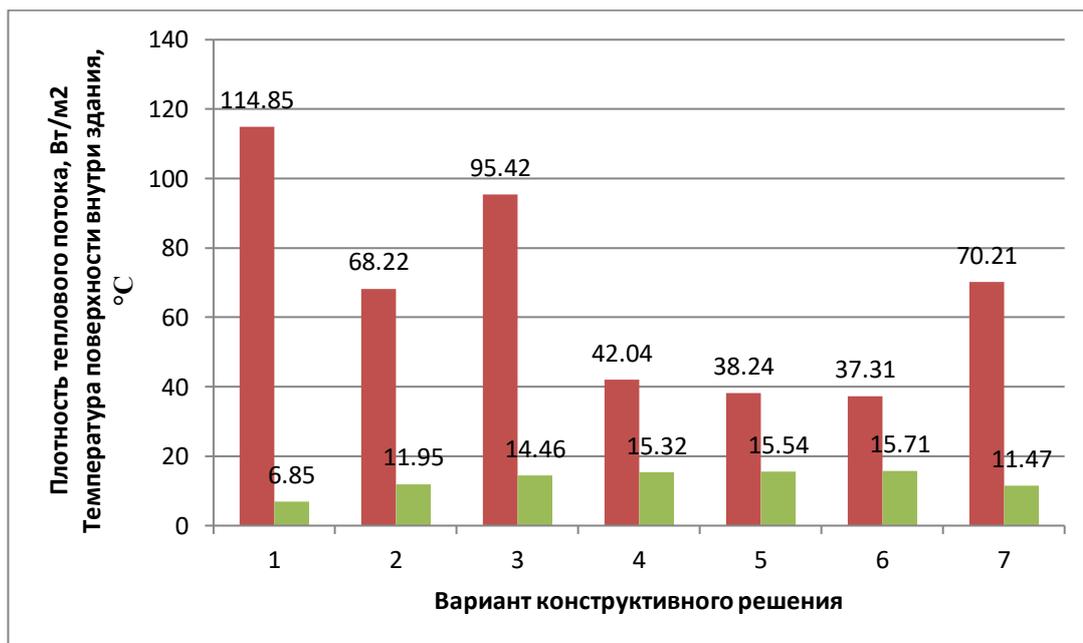


Рисунок 11 – Диаграмма распределения плотности теплового потока и температуры поверхности ограждающей конструкции в зависимости от выбранного расположения теплоизоляционного материала относительно поверхности ограждающей конструкции

Вывод: теплоизоляция ограждающей конструкции внутри здания не энергоэффективна, большой тепловой поток через ограждающую конструкцию указывает на то, что теплоизоляция с внутренней стороны

ограждающей конструкции не выполняет своей основной функции – минимизация потерь тепла.

### **3.2 Влияние комплекса погодных условий**

Анализ повреждений ограждающих строительных конструкций показывает, что снижение тепловой устойчивости зачастую вызвано микроразрушениями материала, в результате резкого перепада температур. Таким образом, можно сделать вывод, что наиболее вероятностное разрушение строительных конструкций происходит не от промерзания строительных конструкций, а от резкого переменного воздействия температур. Тем самым количество циклов замораживания и оттаивания увеличивается. Сдерживающим фактором разрушительного действия резкого перепада температур является тепловая инерция материала ограждающих конструкций, которая характеризует их способность сопротивляться изменению температуры за определённое время. По данным наблюдений за образованиями повреждений от климатических воздействий, можно сделать вывод, что при выборе метода утепления стен недостаточно учитывать показатель нормативных минимальных температур. Ключевую роль играет цикл переменного замораживания – оттаивания. При фазовых превращениях типа «жидкость–твёрдое» расходуется теплота плавления или выделяется теплота льдообразования. Теплофизические характеристики материалов при этом могут сильно изменяться.

Перепад температур влияет на деформируемость слоистых конструкций, переходы температур через  $0^{\circ}\text{C}$  два и более раз за один день приводит к сорбции и десорбции влаги.

Положение фронта промерзания непосредственно связано с энергоэффективностью применяемого теплоизоляционного материала. Действительно, в зоне перемещения фронта промерзания создаются крайне неблагоприятные условия эксплуатации материала ограждающих конструкций вследствие возможного чередования замерзания и оттаивания,

которое может постепенно привести к снижению прочности, а, в конечном счете, и к разрушению конструкции.

Теоретический анализ процессов, происходящих при фазовых переходах подразумевает совместное решение уравнения теплопроводности для твердой фазы и жидкой фазы. Даже если пренебречь естественной конвекцией, то во время процесса фазового перехода в одномерном приближении граница между двумя фазами постоянно перемещается и ее текущая позиция неизвестна.

Одномерное приближение не всегда адекватно описывает процесс тепловлагодпереноса. Решение данной задачи в двух– или трехмерном случае приводит к существенному усложнению расчетов. Из–за вышеуказанных проблем существует лишь ограниченное число аналитических решений для частично упрощенных случаев, поэтому, на практике часто применяются численные методы.

В данном случае при описании распространения тепла в толще ограждающей конструкции возникает задача Стефана [33]. Задача Стефана (или задача с подвижной границей) возникает при решении уравнений диффузии, когда происходит фазовый переход вещества из одного состояния в другое, и в конструкции необходимо учитывать положение границы фазового перехода в каждый момент времени. Общий пример такой задачи – таяние или замерзание льда–воды в ограждающей конструкции.

В настоящее время изучено множество разновидностей задач Стефана, все они отличаются различным количеством фаз, а также размерностью задач. Разработаны аналитические и численные методы решения задачи Стефана, однако точное решение может быть получено лишь в некоторых частных случаях, что приводит к необходимости дальнейшего исследования численных методов решения данной задачи.

При затвердевании значение объемной теплоты фазового перехода выражается формулой:

$$Lv=wr \rho , \tag{3.1}$$

где  $w$  – массовая доля влаги в материале;

$r$  – теплота фазового перехода единицы массы жидкости материала;

$\rho$  – плотность влажного материала.

Точное аналитическое решение задачи Стефана возможно только для ограниченного набора форм тел и граничных условий. Поскольку на практике приходится исследовать многослойные объекты, имеющие разнородные по теплофизическим характеристикам слои, а температура объекта и коэффициент теплоотдачи на его поверхностях изменяются во времени, то о точном аналитическом решении говорить затруднительно. Для упрощения решения данной задачи без существенного снижения достоверности получаемых результатов введем допущение о квазистационарности температурного режима в затвердевшей области. Действительно, процесс затвердевания идет довольно медленно, поэтому температура в объекте хотя и изменяется, но ее пространственное распределение в каждый момент времени можно принять соответствующим установившемуся состоянию. В задачу о фазовых превращениях можно существенно упростить, если заранее задаться распределением температуры в затвердевшей и не затвердевшей части объекта. Благодаря этому решение задачи сводится к определению координаты границы затвердевания с помощью уравнения теплового баланса. При этом заданное пространственное распределение температуры следует выбирать по возможности ближе к пространственному распределению температуры в многослойном объекте на практике.

Так как теплоемкость исследуемого объекта не равна нулю, то по мере продвижения границы затвердевания энтальпия объекта изменяется. Тепловой поток, связанный с изменением энтальпии затвердевшего тела, может быть учтен, если вместо объемной теплоты фазового перехода использовать в расчетах ее эффективное значение:

$$L_{v \text{эфф}} = L_v + C_1 \rho_1 (T_k - T_n) / 2, \quad (3.2)$$

где  $C_1$  – удельная теплоемкость материала,  $\text{кДж/кг} \cdot ^\circ\text{C}$ ,  $\rho_1$  – плотность

материала, кг/м<sup>3</sup>; T<sub>п</sub>– температура на внешней поверхности тела.

Анализ точных аналитических решений задачи Стефана, проведенный в [34] показывает, что приближенные решения, основанные на замене неустановившегося режима в затвердевшей зоне квазиустановившимся режимом соответствуют первым, наиболее весомым членам ряда, которым описывается распределение температуры в объекте в точном аналитическом решении текущее.

Для определения величины теплового потока, подводимого из не затвердевшей области, можно воспользоваться решением задачи нестационарной теплопроводности в полубесконечном объекте, температура поверхности которого в начальный момент времени  $t = 0$  изменяется скачком от начального значения  $T_0$  до конечного значения  $T_k$ :

$$S_0 = - \frac{\lambda_2 \cdot (T_k - T_0)}{\sqrt{\pi \cdot a_2}} \quad (3.3)$$

Решая дифференциальное уравнения относительно  $x_k$ , получаем следующее выражение для текущей во времени границы затвердевания:

$$x_k = \frac{\beta \cdot S_0 \cdot \sqrt{t}}{L_{v \text{эфф}}}, \quad (3.4)$$

$$\text{где параметр } \beta = -1 + \sqrt{1 + \frac{2L_{v \text{эфф}} \lambda_1 (T_k - T_{\text{п}})}{S_0^2}} \quad (3.5)$$

В качестве примеров, иллюстрирующих выведенные соотношения, рассмотрим теплоизоляционный материал – кирпич, имеющий следующие теплофизические характеристики:

Теплопроводность  $\lambda = 0,56$  Вт/м·°С, теплоемкость  $c = 1,05$  кДж/кг·°С,

плотность  $\rho = 1800$  кг/м<sup>3</sup>, начальное содержание влаги в веществе  $w = 0,02$ .

Температура на поверхности стены принимается равной  $T_{\text{п}} = -20$ °С,

начальная температура  $-T_0 = 20$ °С, а температура замерзания влаги –

$T_k = 0$ °С. Процесс промерзания рассмотрен в течение 24 часов.

Результаты расчетов представлены на рисунке 11.

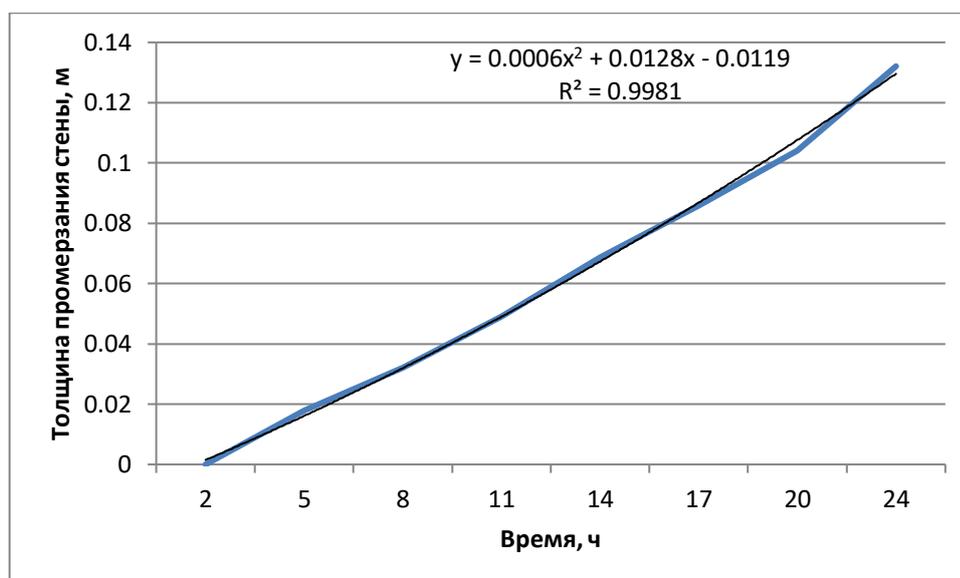


Рисунок 11 – Зависимость толщины промерзания ограждающей конструкции от температуры наружного воздуха, меняющейся в течение 24 ч.

Из построенной зависимости следует, что к исходу 24 часа глубина промерзания кирпичной стены составляет 120 мм.

Вывод: по результатам исследования был построен график зависимости толщины промерзания ограждающей конструкции без утепления от температуры наружного воздуха при нестационарных условиях.

### **3.3 Анализ эффективности теплозащиты существующих конструктивных решений и поиск факторов, влияющих на уровень теплозащиты выступающих архитектурных элементов и ограждающих конструкций при нестационарных условиях**

Энергоэффективность ограждающих конструкций зависит от их температурно–влажностного состояния в холодный период года. В свою очередь, температурно–влажностное состояние наружных ограждающих конструкций зданий зависит от многих факторов. Прежде всего, от нестационарных климатических воздействий в отопительный период, а также от температуры и влажности воздуха внутри помещения, от свойств материалов из которых состоит конструкция, от расположения плотных и пористых слоёв конструкции по отношению к потокам тепла и влаги.

Сильное влияние разности теплопроводности материалов в узле стыка

балконной плиты и кирпичной стены оказывает сильное влияние на теплоперенос через конструкцию и температурное поле. Линии равной температуры параллельные в однородном случае сильно изгибаются (раздвигаются) в месте расположения включения. Каждая теплотехническая неоднородность искажает температурное поле вокруг себя. При сближении двух теплотехнических неоднородностей, каждая из них начнет взаимодействовать с искажением температурного поля, создаваемым соседней неоднородностью. Таким образом, возникнет взаимовлияние теплотехнических неоднородностей. Кроме расстояния между неоднородностями, на величину взаимодействия окажет влияние и «мощность» неоднородностей, т.е. интенсивность искажения температурного поля. При этом, найдутся величины удельных потерь теплоты, для которых взаимовлияние окажется столь малым, что его не удастся зафиксировать даже при максимальном сближении неоднородностей.

Как показывает практика, стационарные условия не позволяют объективно оценить потери тепла через ограждающие конструкции, так как с переменами времен года меняется и температура воздуха, что вызывает необратимые процессы, которые происходят в ограждающих конструкциях. Нестационарные условия отражают как изменяются теплофизические характеристики теплоизоляционного материала под воздействием погодных и климатических условий. При понижении температуры воздуха, когда отметка термометра доходит до  $0^{\circ}\text{C}$ , теплопроводность теплоизоляционного материала повышается, теплоизоляция теряет свои свойства. Измерение температур в толще различных решений ограждающих конструкций заключается в необходимости определения реальной картины градиента температур по толщине ограждающих конструкций [65]. Для оценки теплопотерь через ограждающую конструкцию здания был рассчитан эркер при стационарных и нестационарных условиях.

Рассмотрим изменение основных климатических характеристик (на примере г. Абакан) в холодный период года.

Одним из важнейших факторов, влияющих на теплопотери зданий является наружный климат в зимний период, который имеет ярко выраженный знакопеременный характер (рисунок 12). Воздействие климата на температурно–влажностное состояние поверхностных слоёв конструкций проявляется в большом количестве периодов замораживания и оттаивания, которые разрушают материал, из которого они изготовлены. В ходе исследования климата была произведена оценка его знакопеременности, определены средние отрицательные и средние положительные температуры за последние 10 лет. На рисунке 12 представлены среднестатистические результаты обработки климатических параметров по годам и усредненная кривая за 10 лет [32].

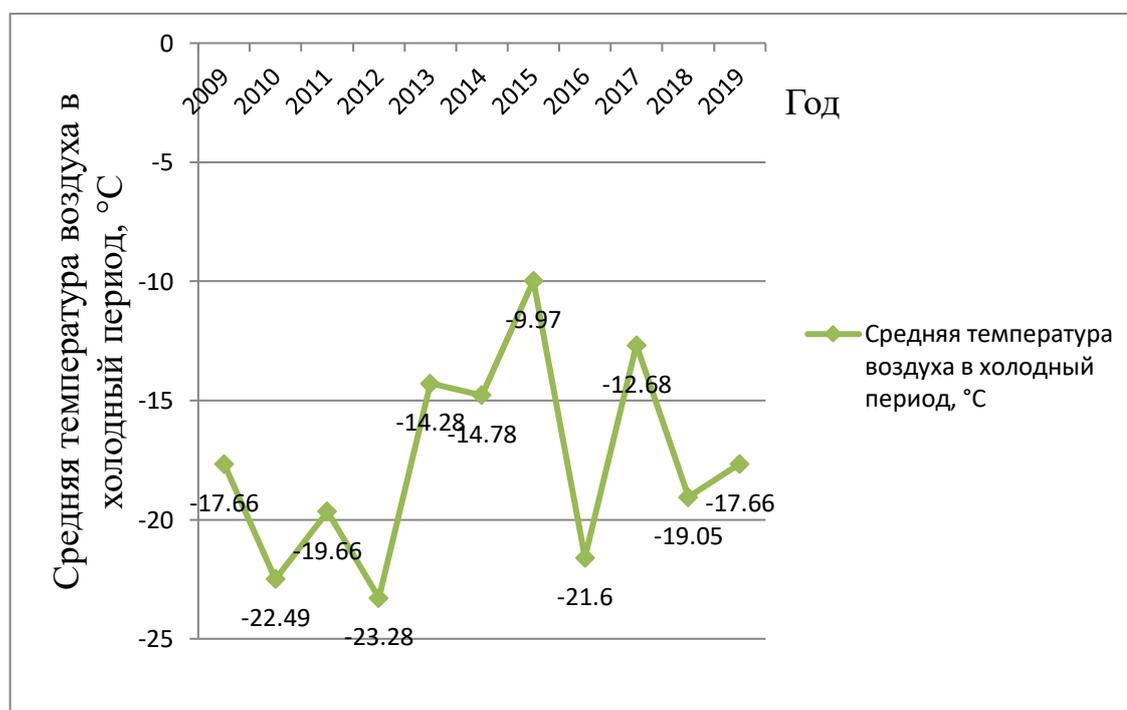


Рисунок 12 – Среднестатистические результаты обработки климатических параметров по годам и усредненная кривая за 10 лет

На графике изображено хаотичное изменение температуры воздуха, это означает, что спрогнозировать среднюю температуру воздуха в холодный период на последующие 10, 20 лет невозможно. Поэтому при проектировании ограждающих конструкций можно ориентироваться на значение средней температуры воздуха за холодный период в течение 10 лет,

как минимум, который необходим при выборе теплоизоляционного материала.

В качестве анализа эффективности теплозащиты существующих конструктивных решений был проведен мониторинг гражданских зданий в г. Абакан на предмет обнаружения мостиков холода в узлах примыкания архитектурных элементов к стене (рисунок 13).

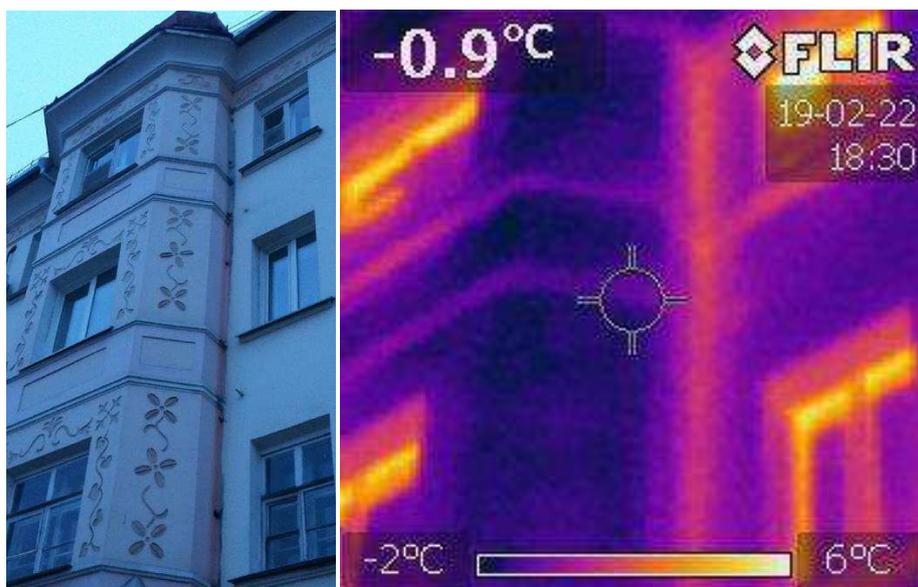


Рисунок 13 – Мостик холода через эркер на уровне 3 этажа

Кирпичное жилое здание 1949 года постройки, имеющее архитектурно выразительную ограждающую конструкцию – эркер. На изображении тепловизионной съемки можно отметить, что мостик холода ограждающей конструкции возникает на стыке плиты перекрытия с наружной стеной.

В рассматриваемом исследовании примем ограждающие конструкции, который имеют светопрозрачные элементы. Поэтому коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  ограждающей конструкции внутри здания принят как для условий внутри помещения  $\alpha = 8,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$ , а температура поверхности будет равна температуре поверхности снаружи здания  $\alpha = 23 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$ ,

На рисунке 14 показана термография по результатам проведенного исследования.

Согласно прил. В [47] г. Абакан находится в III климатической зоне.  
Согласно табл. 2 [47] условия эксплуатации ограждающих конструкций А.

Граничные условия: температура наружного воздуха  $T_H = -2 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  
температура воздуха внутри помещения  $T_{ВН} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

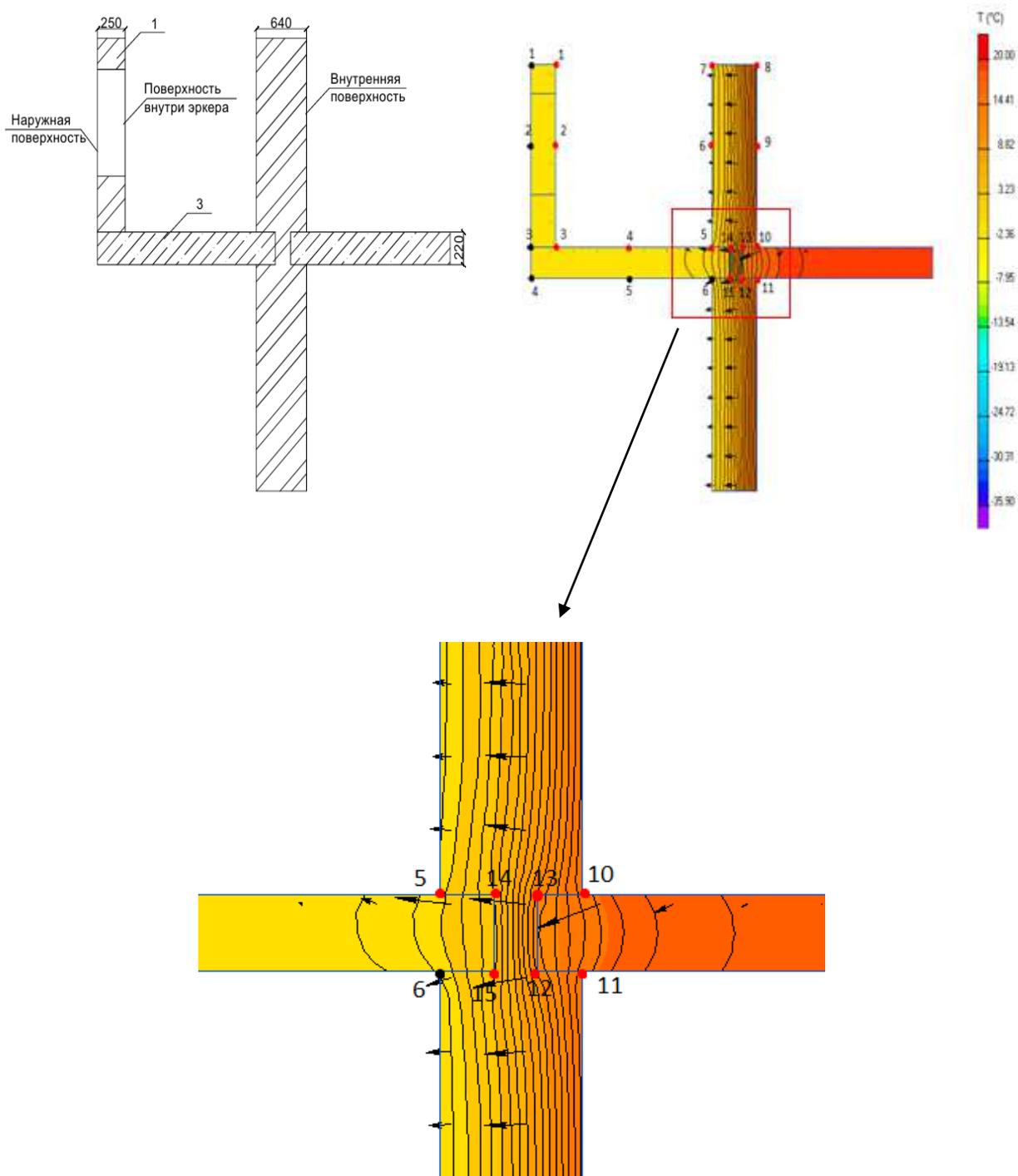


Рисунок 14 – Схема распределения температуры по наружной и внутренней поверхности и теплового потока здания с эркером

Результаты проведенной термографии отражены в таблице 9.

Таблица 9 – Плотность теплового потока и температура поверхности ограждающей конструкции снаружи и внутри здания без утеплителя со светопрозрачным элементом

№ точки	Тепловой поток внутри здания, Вт/ м <sup>2</sup>	Температура поверхности внутри здания, °С	Тепловой поток снаружи здания, Вт/ м <sup>2</sup>	Температура поверхности снаружи здания, °С
1	0,07	-0,92	0,13	-0,91
2	0	-0,9	0	-0,9
3	0,04	-0,9	0	-0,9
4	0,28	-0,88	0	0,9
5	35,33	-1,3	0,18	-0,9
6	9,8	-0,27	47,2	-0,78
7	14,85	-0,17		
8	32,42	-15,55		
9	37,1	-15,45		
10	58,74	-15,9		
11	60,54	-16		
12	67,4	-11,84		
13	30,15	-11,74		
14	24,4	-4,52		
15	26,3	-4,4		

Согласно вышеприведенным табличным значениям, наибольшие потери тепла обнаружены на стыке балконной плиты с кирпичной стеной (точка 6 на схеме). Также, согласно таблице 5 [2] нормируемый температурный перепад между температурой внутреннего воздуха и температурой внутренней поверхности ограждающей конструкции не должен превышать 4°С для жилых зданий. Для расчета были заданы граничные условия ( $t = 20^{\circ}\text{C}$  внутри помещения), из чего следует, что температурный

перепад больше нормируемого. Отсюда можно сделать вывод, что во избежание выпадения конденсата на поверхности ограждающей конструкции нужно утеплить ограждающую конструкцию и узел примыкания стены к балконной плите.

В случае, когда стены утеплены достаточно, а потолок или пол нет, то возникает конденсат на полу или потолке, поскольку стены становятся исключенными из этого процесса. Если ограждающие конструкции утеплить снаружи, то стены, потолок и пол будут иметь разницу на внутренних поверхностях с температурой воздуха внутри помещения в рамках нормативов [2].

С целью проанализировать плотность теплового потока через ограждающие конструкции далее будут рассмотрены несколько видов теплоизоляционного материала.

### **3.4 Анализ плотности теплового потока и распределения температур в толще ограждающей конструкции с утеплением по внешнему контуру теплоизоляционным материалом при стационарных и нестационарных условиях**

#### **3.4.1 Анализ плотности теплового потока и распределения температур в толще ограждающей конструкции с утеплением по внешнему контуру минераловатными плитами при стационарных и нестационарных условиях**

Под воздействием климатических и погодных условий теплофизические характеристики ограждающей конструкции могут значительно меняться. Когда температура воздуха становится на отметке 0°C, влага, которая сосредоточена в порах теплоизоляционного материала начинает менять свое агрегатное состояние, тем самым воздействуя на свойства материала. Например, на коэффициент теплопроводности материала.

Теплопроводность — способность материальных тел проводить энергию (теплоту) от более нагретых частей тела к менее нагретым частям тела путём хаотического движения частиц тела (атомов, молекул, электронов и т. п.). Такой теплообмен может происходить в любых телах с неоднородным распределением температур, но механизм переноса теплоты будет зависеть от агрегатного состояния вещества.

При понижении температуры наружного воздуха, теплопроводность ограждающей конструкции повышается, в следствие чего конструкция более интенсивно отдает тепло в окружающее пространство, в данном случае, на улицу, что ведет к увеличению теплопотерь.

С целью сравнения плотностей теплового потока через ограждающую конструкцию в стационарных и нестационарных условиях были заданы исходные данные для их расчета в программном комплексе Elcut:

$\lambda_1 = 0,038 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$  – теплопроводность минваты в сухом состоянии

$\lambda_2 = 0,045 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$  – теплопроводность в увлажненном состоянии

Вариант 1 – Стационарные условия

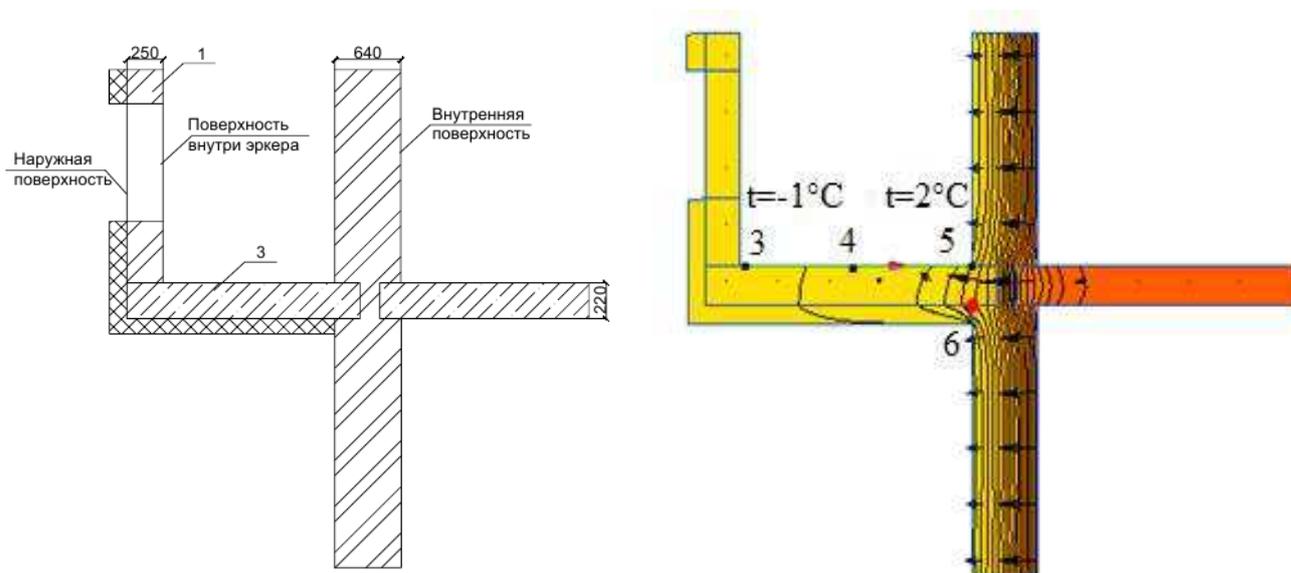


Рисунок 15 – Схема распределения теплового потока и температуры по наружной и внутренней поверхности здания с эркером, утепленным минераловатными плитами по наружному контуру при стационарном режиме

Таблица 10 – Плотность теплового потока и температура поверхности ограждающей конструкции снаружи и внутри здания с утеплением минераловатными плитами по наружному контуру при стационарном режиме со светопрозрачным элементом

№ точки	Плотность теплового потока снаружи здания, Вт/м <sup>2</sup>	Температура поверхности на стыке утеплителя с кирпичной стеной, °С
3	1,37	-0,98
4	1,78	-0,72
5	36,46	2
6	10,39	2,8

#### Вариант 2 – Нестационарные условия

Таблица 11 – Зависимость теплопроводности минваты от наружной температуры воздуха

Теплопроводность материала, Вт/°С • м	Температура воздуха, °С
0,3	-30
0,2	-20
0,045	-10
0,04	0
0,038	10
0,038	20
0,038	30

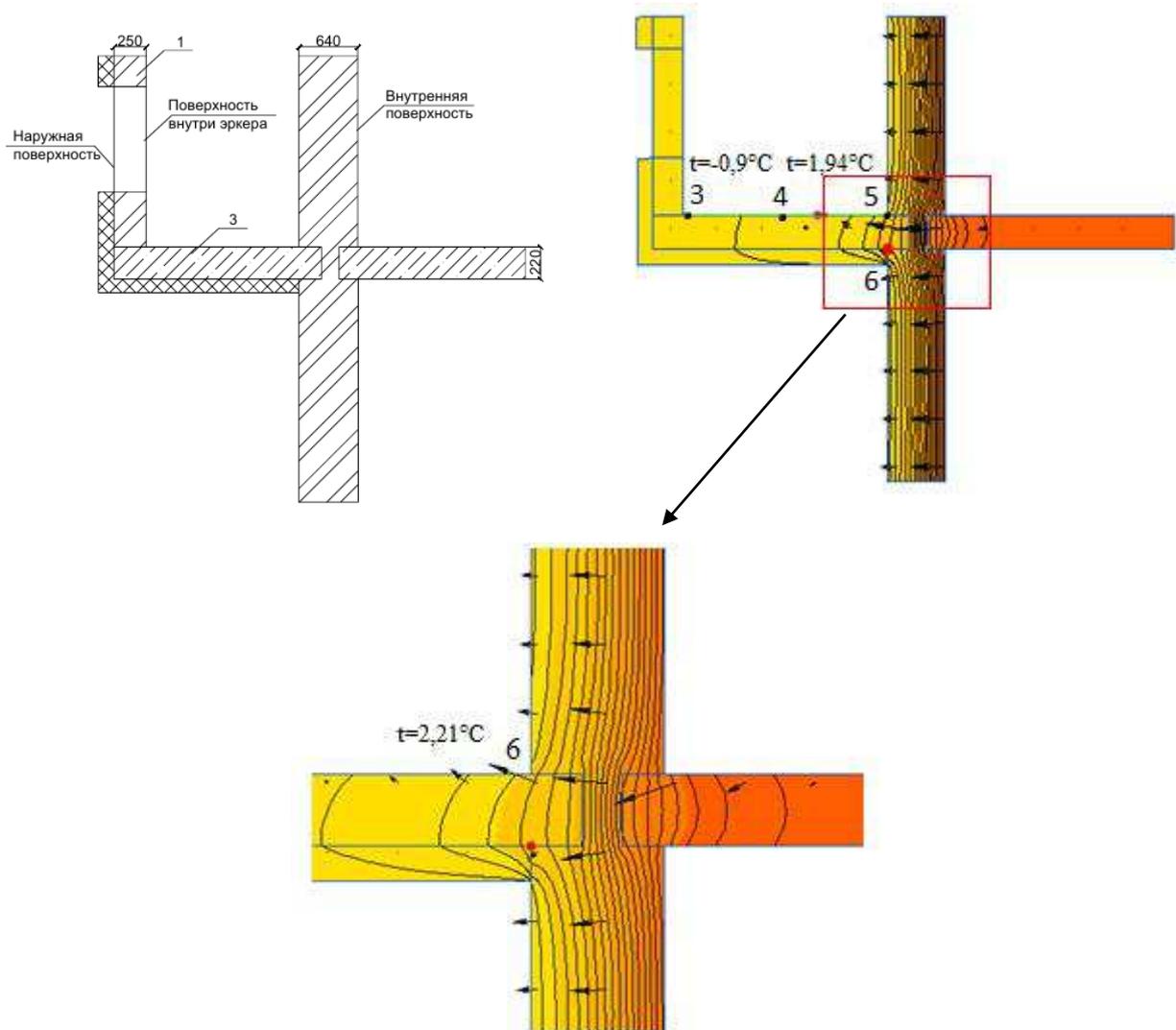


Рисунок 16 – Схема распределения теплового потока и температуры по наружной и внутренней поверхности здания с эркером, утепленным минераловатными плитами по наружному контуру при нестационарном режиме

Результаты проведенной термографии отражены в таблице 12.

Таблица 12 – Плотность теплового потока и температура поверхности ограждающей конструкции снаружи и внутри здания с утеплением минераловатными плитами по наружному контуру при нестационарном режиме со светопрозрачным элементом

№ точки	Тепловой поток снаружи здания, Вт/м <sup>2</sup>	Температура поверхности на стыке утеплителя с кирпичной стеной, °С
3	0,46	-0,92

## Окончание таблицы 12

№ точки	Тепловой поток снаружи здания, Вт/м <sup>2</sup>	Температура поверхности на стыке утеплителя с кирпичной стеной, °С
4	1,9	-0,78
5	28,56	1,97
6	37,31	2,21

На стыке балконной плиты, утепленной минераловатной плитой по наружному контуру, с кирпичной стеной (в точке 6) плотность теплового потока при стационарных условиях меньше плотности теплового потока при нестационарных условиях на 39%, температура поверхности при нестационарных увеличилась на 22% по сравнению со стационарными условиями.

Вывод: стационарные условия исследования не обеспечивают достоверной информации о поведении ограждающей конструкции в реальных условиях. На этапе проектирования следует учитывать влияние погодных и климатических условий на теплофизические характеристики ограждающей конструкции, т.к. это способствует правильному и рациональному выбору теплоизоляционного материала для ограждающей конструкции.

### **3.4.2 Анализ плотности теплового потока и распределения температур в толще ограждающей конструкции с утеплением по внешнему контуру пенополиуретаном при стационарных и нестационарных условиях**

С целью сравнения плотностей теплового потока через ограждающую конструкцию в стационарных и нестационарных условиях были заданы исходные данные для их расчета в программном комплексе Elcut:

$\lambda_1=0,025$  Вт/(м·°С) – теплопроводность пенополиуретана в сухом состоянии

$\lambda_2=0,03 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{С})$  – теплопроводность пенополиуретана в увлажненном состоянии

Вариант 1 – Стационарные условия

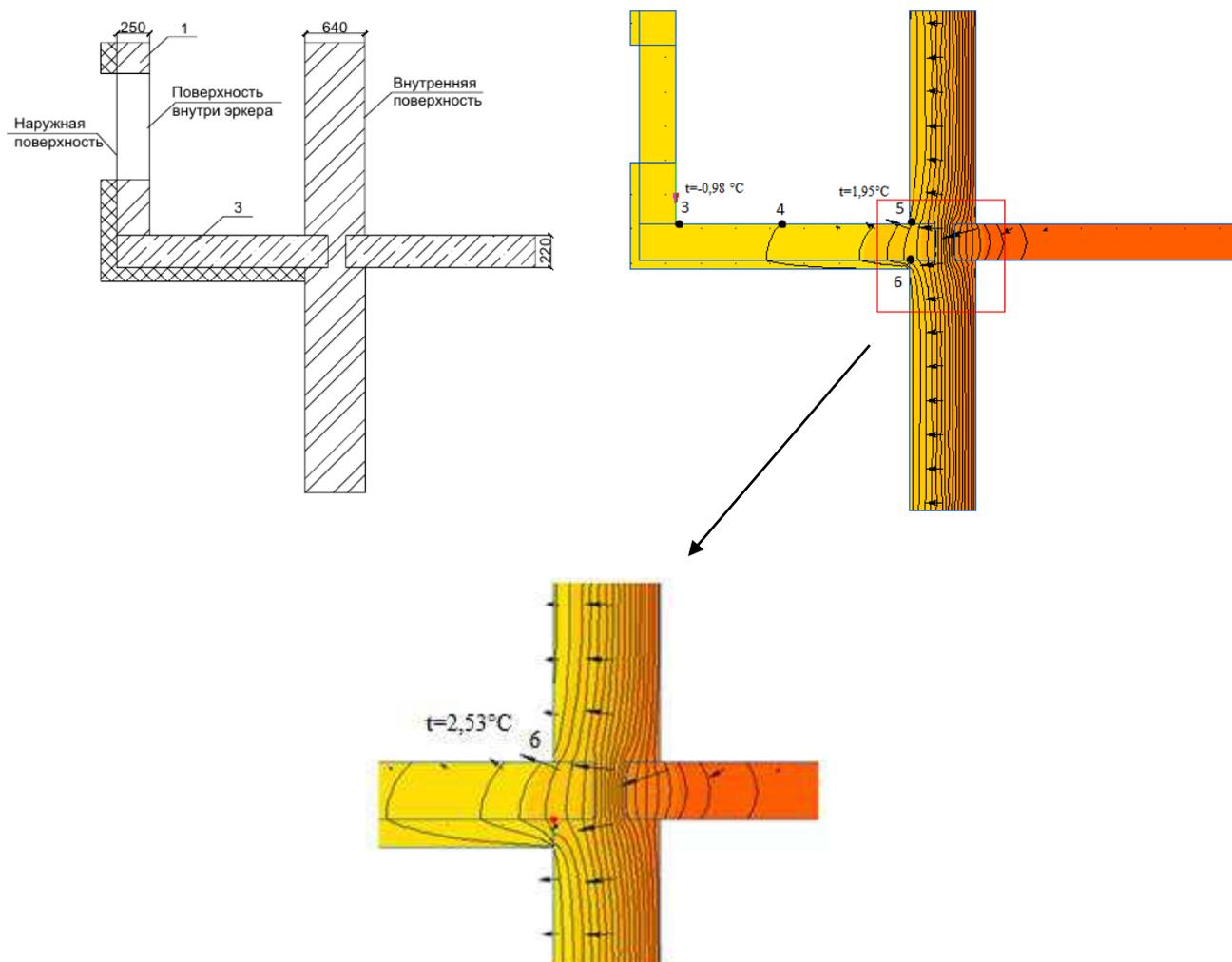


Рисунок 17 – Схема распределения теплового потока и температуры по наружной и внутренней поверхности здания с эркером, утепленным пенополиуретаном по наружному контуру при стационарном режиме

Таблица 13 – Плотность теплового потока и температура поверхности ограждающей конструкции снаружи и внутри здания с утеплением пенополиуретаном по наружному контуру при стационарном режиме со светопрозрачным элементом

№ точки	Плотность теплового потока снаружи здания, Вт/м <sup>2</sup>	Температура поверхности на стыке утеплителя с кирпичной стеной, °С
3	0,68	-0,98

Окончание таблицы 13

№ точки	Плотность теплового потока снаружи здания, Вт/м <sup>2</sup>	Температура поверхности на стыке утеплителя с кирпичной стеной, °С
4	1,64	-0,7
5	15,08	1,95
6	22,91	2,53

Вариант 2 – Нестационарные условия

Таблица 14 – Зависимость теплопроводности пенополиуретана от наружной температуры воздуха

Теплопроводность материала, Вт/°С •м	Температура воздуха, °С
0,4	-30
0,35	-20
0,3	-10
0,03	0
0,025	10
0,025	20
0,025	30

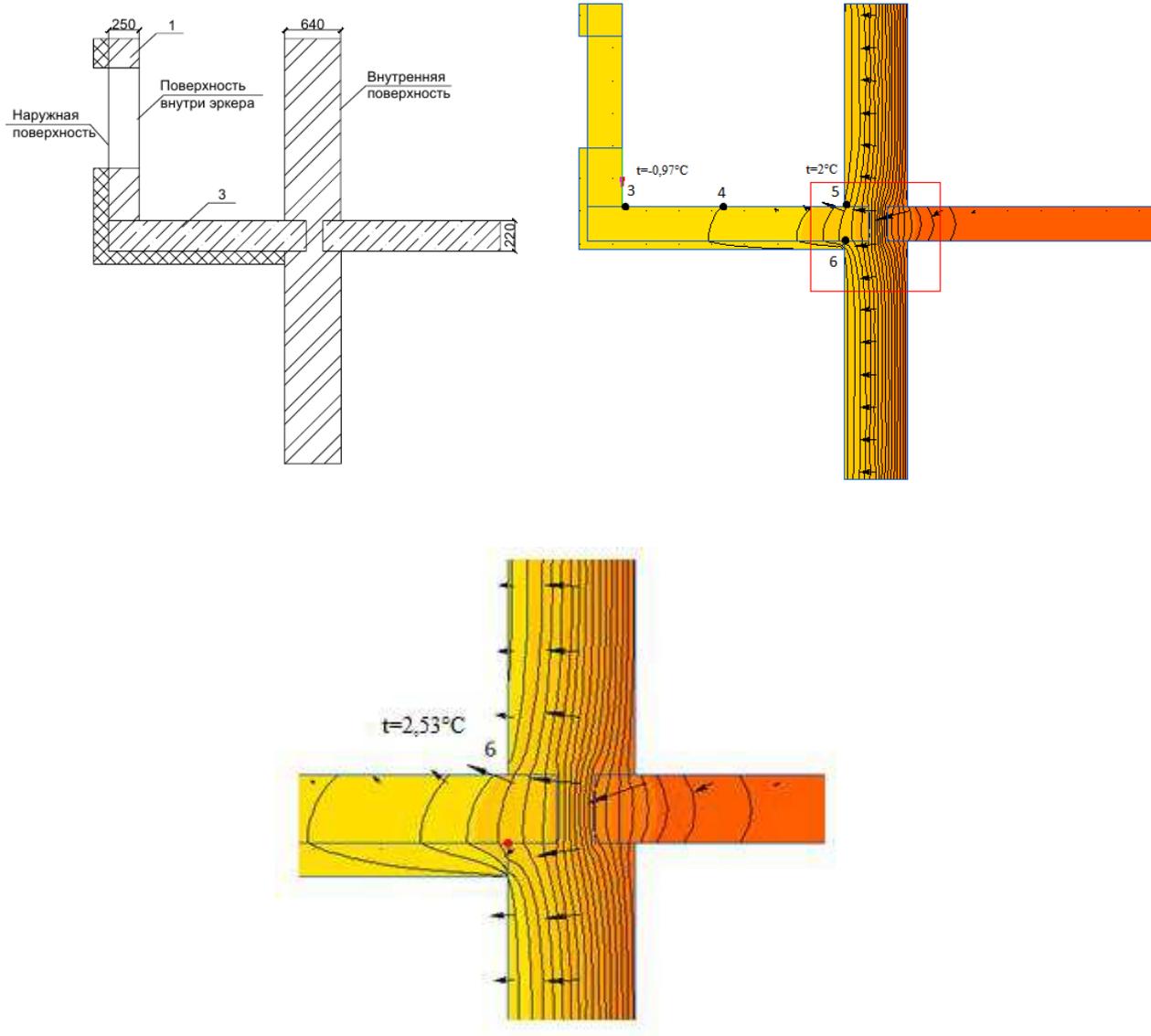


Рисунок 18 – Схема распределения теплового потока и температуры по наружной и внутренней поверхности здания с эркером, утепленным пенополиуретаном по наружному контуру при нестационарном режиме

Результаты проведенной термографии отражены в таблице 15.

Таблица 15 – Плотность теплового потока и температура поверхности ограждающей конструкции снаружи и внутри здания с утеплением пенополиуретаном по наружному контуру при нестационарном режиме со светопрозрачным элементом

№ точки	Тепловой поток снаружи здания, Вт/м <sup>2</sup>	Температура поверхности на стыке утеплителя с кирпичной стеной, °С
3	1,28	-0,97

Окончание таблицы 15

№ точки	Тепловой поток снаружи здания, Вт/м <sup>2</sup>	Температура поверхности на стыке утеплителя с кирпичной стеной, °С
4	2,03	-0,7
5	15,38	2
6	23,38	2,53

На стыке балконной плиты, утепленной пенополиуретаном по наружному контуру, с кирпичной стеной (в точке 6) плотность теплового потока при стационарных условиях меньше плотности теплового потока при нестационарных условиях на 39%, температура поверхности при нестационарных не изменилась по сравнению со стационарными условиями.

Вывод: стационарные условия исследования не обеспечивают достоверной информации о поведении ограждающей конструкции в реальных условиях. На этапе проектирования следует учитывать влияние погодных и климатических условий на теплофизические характеристики ограждающей конструкции, т.к. это способствует правильному и рациональному выбору теплоизоляционного материала для ограждающей конструкции.

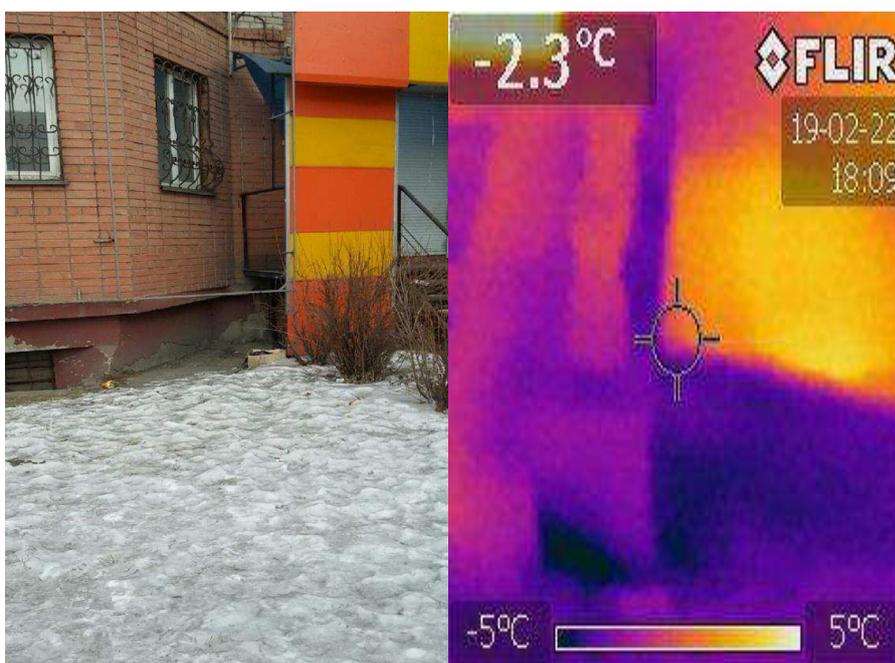


Рисунок 19 – Мостик холода через эркер в кирпичном доме на уровне 1 этажа

На рисунке 19 изображено кирпичное жилое здание 2003 года постройки. На изображении тепловизионной съемки так же можно отметить, что мостик холода ограждающей конструкции возникает на стыке плиты перекрытия с наружной стеной.

Вывод: исходя из вышеуказанного можно сделать вывод, что здания были построены в разный период XX и XXI века, но должное внимание теплотерям через ограждающие конструкции, имеющие архитектурно-выразительную форму, не было уделено.

### **3.5 Расчет плотности теплового потока по существующей формуле с учетом влияния солнечной радиации на ограждающую конструкцию**

Одна из форм передачи теплоты обусловлена лучистым (радиационным) теплообменом и совершается путем двойного превращения энергии: сперва из тепловой в электромагнитную в месте излучения, а затем, после того как она прошла весь путь в теплопрозрачной среде, обратно в тепловую в месте поглощения. Таким образом, эта форма передачи теплоты характеризуется тем, что часть энергии тела, определяемая температурой его поверхности, преобразуется в энергию теплового излучения и уже в таком виде передается в окружающее пространство. Встречая на своем пути другое тело, лучистая энергия частично отражается от его поверхности и частично поглощается им, т. е. проникает на некоторую его глубину, зависящую от прозрачности тела. Радиационным способом совершается практически мгновенная передача теплоты; так, в воздухе скорость передачи равна 300 000 км/с. Количество солнечной энергии, поступающей на поверхность Земли, зависит от географической широты и изменяется в связи с изменением астрономических и метеорологических условий. [19]

Коэффициент излучения (или степень черноты) – мера способности объекта поглощать или излучать ИК-энергию. Коэффициент  $\epsilon$  показывает отношение энергии теплового излучения 'серого тела' согласно Закону Стефана Больцмана, к излучению 'абсолютно черного тела' при той же

температуре. Коэффициент излучения абсолютно черного тела  $\varepsilon = 1$ .

При проведении численных экспериментов величина коэффициента теплоотдачи со стороны помещения, температура в котором  $t_{\text{вн}} = 20^\circ\text{C}$ , а коэффициент теплоотдачи  $\alpha = 8,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ , на внешней поверхности  $\alpha = 23 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ . Ориентировочные значения приведенной степени черноты для кирпичной стены  $\varepsilon_{\text{пр}} = 0,9$  и коэффициента поглощения солнечной радиации  $\rho = 0,7$  приведены в [13] и [14]. Суточные изменения температуры наружного воздуха  $T_c(\tau)$ , а также плотности теплового потока суммарной солнечной радиации  $J(\tau)$  (расчет). Считается, что контакт между отдельными слоями ограждения – идеальный. Поэтому величина термического контактного сопротивления  $R_k$  принималась равной нулю.

Однослойная кирпичная стена толщиной  $\delta_k = 0,51 \text{ м}$  с теплофизическими характеристиками:  $\lambda_k = 0,7 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ ,  $a_k = 4,42 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ . Термическое сопротивление теплопередаче конструкции  $R_0 = 0,708 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C} / \text{Вт}$ .

Двухслойная стена из слоя кирпичной кладки ( $\delta_k = 0,38 \text{ м}$ ) и теплоизоляционного слоя – пенополистерол:  $\delta = 0,1 \text{ м}$ ;  $\lambda = 0,038 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $a = 7,14 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2 / \text{с}$ . Для этого конструктивного решения  $R_0 = 2,189 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C} / \text{Вт}$ .

Рассматривался случай, когда теплоизоляционный слой был расположен с наружной стороны ограждения. При  $\tau = 0$  начальная температура многослойной стенки описывалась ломаной кривой, характерной для стационарного состояния. Затем производился расчет температурного поля последовательно в течение пяти суток при периодических изменениях  $T_c(\tau)$  и  $J(\tau)$ . Распределения нестационарных температур ограждения в период пятих суток и принимались в качестве искомым. Кривые показывают нестационарные температуры наружной поверхности конструкций.

Для выявления влияния слоя утеплителя на величину тепловых потерь многослойной ограждающей конструкции определялись величины плотностей тепловых потоков на наружной поверхности ограждения

$$q_{н.пов.} = \alpha_n [T_c(\tau) - T_{н.пов}(\tau)] + \rho J(\tau) + \varepsilon_{пр} \cdot \sigma_0 + [T_c^4(\tau) - T_{н.пов}^4(\tau)], \text{ Вт/м}^2, \quad (3.6)$$

где  $T_{н.пов}(\tau)$  – температура наружной поверхности конструкции.

$\sigma_0$  – постоянная Стефана–Больцмана, равная  $5,7 \cdot 10^{-8}$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>), формула 4.3 [13]

Рассмотрим зависимость плотности теплового потока на наружной поверхности ограждающей конструкции (без теплоизоляции) от суточного хода температур наружного воздуха в самый морозный день за холодный период в 2019 году. Для наглядности результаты отображены на графике (рисунок 20).

$$1. T_B(00:00) = -34^\circ\text{C}$$

$$T_{н.пов.}(\tau) = -29,6^\circ\text{C}, \text{ тогда}$$

$$q_{н.п.} = 23 \cdot [10 - (-29,6)] + 0,7 \cdot 40 + 0,9 \cdot 5,7 \cdot 10^{-8} + [10^4 - (-29,6^4)] = 75,85 \text{ Вт/м}^2.$$

$$2. T_B(03:00) = -35^\circ\text{C}$$

$$T_{н.пов.}(\tau) = -29,7^\circ\text{C}, \text{ тогда}$$

$$q_{н.п.} = 23 \cdot [10 - (-29,7)] + 0,7 \cdot 40 + 0,9 \cdot 5,7 \cdot 10^{-8} + [10^4 - (-29,7^4)] = 76,9 \text{ Вт/м}^2.$$

$$3. T_B(06:00) = -37^\circ\text{C}$$

$$T_{н.пов.}(06:00) = -29,9^\circ\text{C}, \text{ тогда}$$

$$q_{н.п.} = 23 \cdot [10 - (-29,9)] + 0,7 \cdot 40 + 0,9 \cdot 5,7 \cdot 10^{-8} + [10^4 - (-29,9^4)] = 78,6 \text{ Вт/м}^2$$

$$4. T_B(09:00) = -35^\circ\text{C}$$

$$T_{н.пов.}(\tau) = -29,7^\circ\text{C}, \text{ тогда}$$

$$q_{н.п.} = 23 \cdot [10 - (-29,7)] + 0,7 \cdot 40 + 0,9 \cdot 5,7 \cdot 10^{-8} + [10^4 - (-29,7^4)] = 76,9 \text{ Вт/м}^2.$$

$$5. T_B(12:00) = -28^\circ\text{C}$$

$$T_{н.пов.}(\tau) = -24,2^\circ\text{C}, \text{ тогда}$$

$$q_{н.п.} = 23 \cdot [10 - (-24,2)] + 0,7 \cdot 40 + 0,9 \cdot 5,7 \cdot 10^{-8} + [10^4 - (-24,2^4)] = 33,37 \text{ Вт/м}^2.$$

$$6. T_B(15:00) = -24^\circ\text{C}$$

$$T_{н.пов.}(\tau) = -22,7^\circ\text{C}, \text{ тогда}$$

$q_{\text{н.п.}} = 23 \cdot [10 - (-22,7)] + 0,7 \cdot 40 + 0,9 \cdot 5,7 \cdot 10^{-8} + [10^4 - (-22,7^4)] = 25,63$   
Вт/м<sup>2</sup>.

7.  $T_{\text{в}}(18:00) = -27^{\circ}\text{C}$

$T_{\text{н.пов.}}(\tau) = -24,6^{\circ}\text{C}$ , тогда

$q_{\text{н.п.}} = 23 \cdot [10 - (-24,6)] + 0,7 \cdot 40 + 0,9 \cdot 5,7 \cdot 10^{-8} + [10^4 - (-24,6^4)] = 35,7$  Вт/м<sup>2</sup>.

8.  $T_{\text{в}}(21:00) = -31^{\circ}\text{C}$

$T_{\text{н.пов.}}(\tau) = -28,1^{\circ}\text{C}$ , тогда

$q_{\text{н.п.}} = 23 \cdot [10 - (-28,1)] + 0,7 \cdot 40 + 0,9 \cdot 5,7 \cdot 10^{-8} + [10^4 - (-28,1^4)] = 63,43$   
Вт/м<sup>2</sup>.

9.  $T_{\text{в}}(24:00) = -34^{\circ}\text{C}$

$T_{\text{н.пов.}}(\tau) = -29,6^{\circ}\text{C}$ , тогда

$q_{\text{н.п.}} = 23 \cdot [10 - (-29,6)] + 0,7 \cdot 40 + 0,9 \cdot 5,7 \cdot 10^{-8} + [10^4 - (-29,6^4)] = 75,85$   
Вт/м<sup>2</sup>.

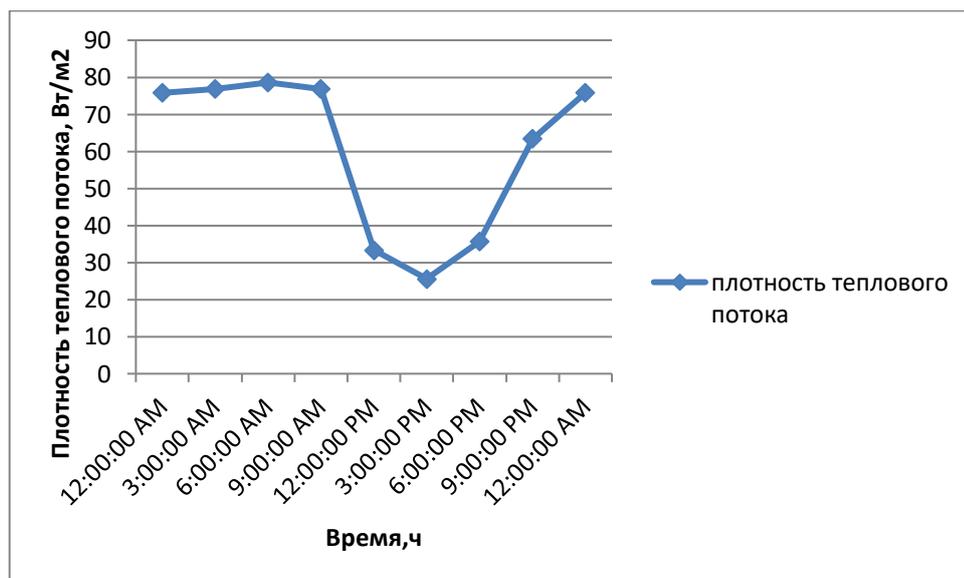


Рисунок 20 – Суточные изменения плотности теплового потока на наружной поверхности стены здания без утепления

Рассмотрим зависимость плотности теплового потока на наружной поверхности ограждающей конструкции (с теплоизоляцией пенополистеролом снаружи) от суточного хода температур наружного воздуха в самый морозный день за холодный период в 2019 году. Для

наглядности результаты отображены на графике (рисунок 21).

1.  $T_B(00:00) = -34^\circ\text{C}$

$T_{\text{н.пов.}}(\tau) = -30^\circ\text{C}$ , тогда

$$q_{\text{н.п.}} = 23 \cdot [10 - (-30)] + 0,4 \cdot 40 + 0,9 \cdot 5,7 \cdot 10^{-8} + [10^4 - (-30^4)] = 37,5 \text{ Вт/м}^2.$$

2.  $T_B(03:00) = -35^\circ\text{C}$

$T_{\text{н.пов.}}(\tau) = -31,3^\circ\text{C}$ , тогда

$$q_{\text{н.п.}} = 23 \cdot [10 - (-31,3)] + 0,4 \cdot 40 + 0,9 \cdot 5,7 \cdot 10^{-8} + [10^4 - (-31,3^4)] = 38 \text{ Вт/м}^2.$$

3.  $T_B(06:00) = -37^\circ\text{C}$

$T_{\text{н.пов.}}(06:00) = -29,9^\circ\text{C}$ , тогда

$$q_{\text{н.п.}} = 23 \cdot [10 - (-29,9)] + 0,4 \cdot 40 + 0,9 \cdot 5,7 \cdot 10^{-8} + [10^4 - (-29,9^4)] = 41,2 \text{ Вт/м}^2$$

4.  $T_B(09:00) = -35^\circ\text{C}$

$T_{\text{н.пов.}}(\tau) = -31,3^\circ\text{C}$ , тогда

$$q_{\text{н.п.}} = 23 \cdot [10 - (-31,3)] + 0,4 \cdot 40 + 0,9 \cdot 5,7 \cdot 10^{-8} + [10^4 - (-31,3^4)] = 38 \text{ Вт/м}^2.$$

5.  $T_B(12:00) = -28^\circ\text{C}$

$T_{\text{н.пов.}}(\tau) = -24,2^\circ\text{C}$ , тогда

$$q_{\text{н.п.}} = 23 \cdot [10 - (-24,2)] + 0,4 \cdot 40 + 0,9 \cdot 5,7 \cdot 10^{-8} + [10^4 - (-24,2^4)] = 29,8 \text{ Вт/м}^2.$$

6.  $T_B(15:00) = -24^\circ\text{C}$

$T_{\text{н.пов.}}(\tau) = -23,1^\circ\text{C}$ , тогда

$$q_{\text{н.п.}} = 23 \cdot [10 - (-23,1)] + 0,4 \cdot 40 + 0,9 \cdot 5,7 \cdot 10^{-8} + [10^4 - (-23,1^4)] = 24,81 \text{ Вт/м}^2.$$

7.  $T_B(18:00) = -27^\circ\text{C}$

$T_{\text{н.пов.}}(\tau) = -23,7^\circ\text{C}$ , тогда

$$q_{\text{н.п.}} = 23 \cdot [10 - (-23,7)] + 0,4 \cdot 40 + 0,9 \cdot 5,7 \cdot 10^{-8} + [10^4 - (-23,7^4)] = 29,3 \text{ Вт/м}^2.$$

8.  $T_B(21:00) = -31^\circ\text{C}$

$T_{\text{н.пов.}}(\tau) = -28,8^\circ\text{C}$ , тогда

$$q_{\text{н.п.}} = 23 \cdot [10 - (-28,8)] + 0,4 \cdot 40 + 0,9 \cdot 5,7 \cdot 10^{-8} + [10^4 - (-28,8^4)] = 34,4 \text{ Вт/м}^2.$$

9.  $T_{\text{н.пов.}}(\tau) = -30^\circ\text{C}$ , тогда

$$q_{\text{н.п.}} = 23 \cdot [10 - (-30)] + 0,4 \cdot 40 + 0,9 \cdot 5,7 \cdot 10^{-8} + [10^4 - (-30^4)] = 37,5 \text{ Вт/м}^2.$$

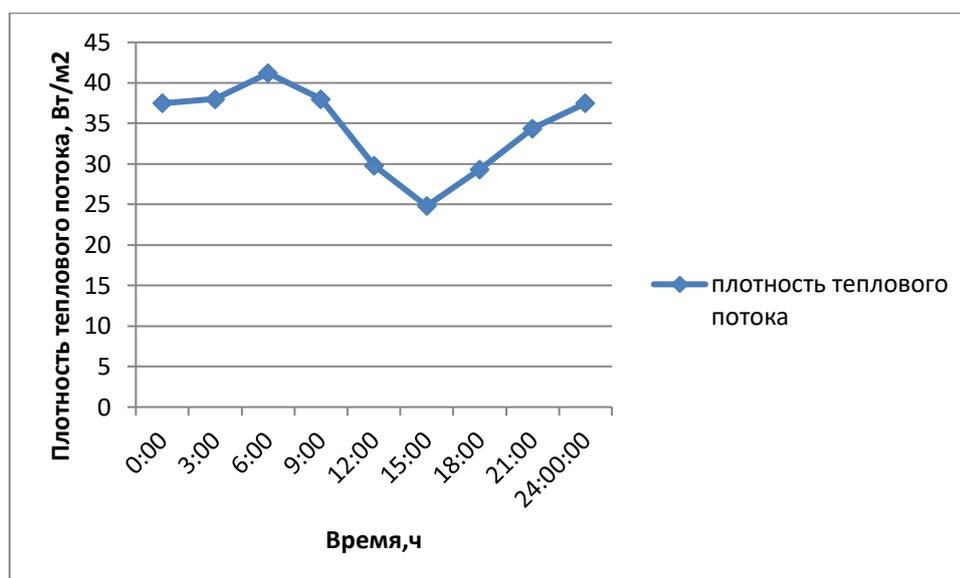


Рисунок 21 – Суточные изменения плотности теплового потока на наружной поверхности стены с утеплением снаружи здания

Пределы суточных изменений величины  $q_{н.п.}$  из расчета приведены в таблице 16.

Таблица 16 – Пределы суточных изменений величины  $q_{н.п.}$

Однослойная кирпичная стена, Вт/м <sup>2</sup>	Теплоизоляция на наружной поверхности, Вт/м <sup>2</sup>
25,63–78,6	24,81–41,2

Вывод: как видно из таблицы 16, суточные колебания величины  $q_{н.п.}$  для ограждающей конструкции с наружной теплоизоляцией оказались слабыми. Если учесть небольшое изменение температуры наружных поверхностей во времени (в пределах 5 градусов), то следует оценить эту ограждающую конструкцию как теплоустойчивую. Повышенная теплоустойчивость исследуемой составной стены объясняется высокой термической массивностью конструкции и невысокими коэффициентами теплопроводности материалов слоев.

Представленные на рисунке 22 результаты говорят о том, что наличие теплоизоляционного слоя существенным образом отражается на величине

тепловых потерь.

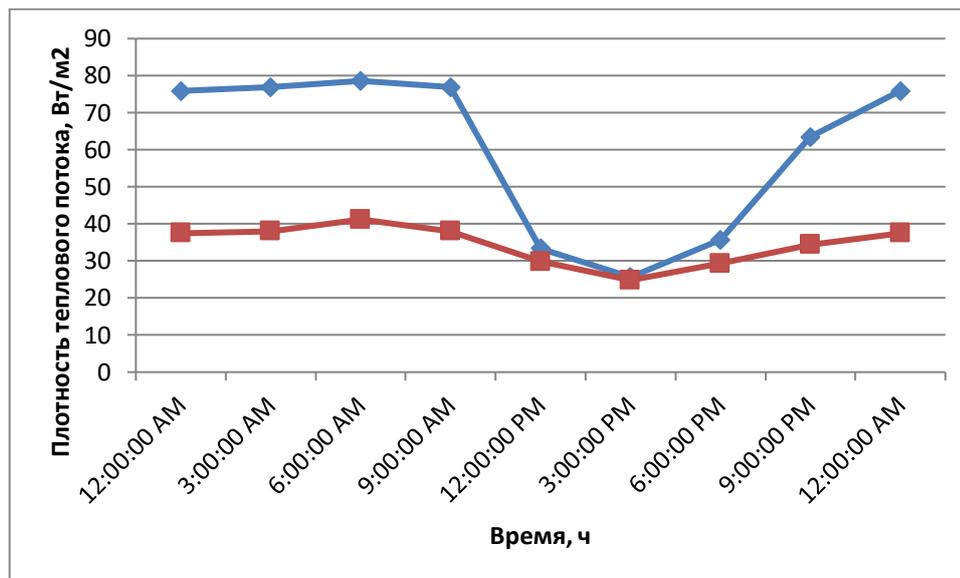


Рисунок 22 – Сводный график суточного изменения плотности теплового потока ограждающей конструкции без утепления и утеплителем по наружному контуру

Вывод: впервые была выведена зависимость суточного изменения плотности теплового потока ограждающей конструкции без утепления и с утеплителем по наружному контуру при нестационарных условиях, т.е. с переменными значениями теплофизических характеристик материалов конструкций, а именно теплопроводности материала.

### 3.6 Влияние скорости ветра на теплотехнические характеристики ограждающих конструкций

В процессе эксплуатации ограждающие конструкции находятся под воздействием различных факторов внешней окружающей среды.

К таким воздействиям относятся температура и влажность наружного воздуха; скорости и направления ветра и др.

Большинство внешних воздействий, оказывающих влияние на ограждающие конструкции, проявляются одновременно: например, действие низкой температуры и большой скорости ветра зимой, высокой температуры и солнечной радиации летом. Совместное действие внешних нагрузок может привести к чрезмерному переохлаждению или перегреву конструкций.

Возникновение таких ситуаций должно быть учтено как на стадии проектирования, так и в процессе эксплуатации.

Расчет теплозащиты гражданских зданий в зимний период производится в соответствии с [2]. Значение коэффициента теплоотдачи для наружной поверхности  $\alpha_n = 23 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$  принято при следующих допущениях: поверхность здания гладкая и по своим свойствам близка к глиняному обожженному кирпичу; скорость ветра в пределах 5 м/с. Однако для некоторых климатических регионов России расчетная скорость ветра для зимних условий превышает 10 м/с. Это может привести к ошибкам в проектировании ограждающих конструкций для данных регионов.

Известно, что в общем случае коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности  $\alpha_n$  зависит от условий конвективного теплообмена и теплового излучения  $\alpha_n = \alpha_{нк} + \alpha_{нл}$ , где  $\alpha_{нк}$  — коэффициент теплоотдачи конвекцией;  $\alpha_{нл}$  — коэффициент теплоотдачи излучением.

Температура наружного воздуха для зимнего периода принимается равной  $T_v = -37^\circ\text{С}$ , температура на наружной поверхности стены принималась в соответствии с ранее произведенными расчетами  $T_{ст} = -30^\circ\text{С}$ .

Коэффициент теплоотдачи излучением в случае, если наружная поверхность исследуемой стены находится далеко от стен других зданий,

можно определять по формуле  $\alpha_{нл} = \varepsilon \cdot C_0 \cdot 10^{-8} \frac{(T_v^4 - T_{ст}^4)}{(T_v - T_{ст})}$ , где

$\varepsilon$  — приведенная степень черноты системы;

$C_0$  — коэффициент излучения абсолютно черного тела, равный  $5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ ;  $T_{ст}$  — температура наружной поверхности стены;  $T_v$  — температура наружного воздуха.

Значение  $\alpha_{нк}$  можно вычислить по формуле Франка [54]

$$\alpha_{нк} = 7,74v^{0,656} + 3,78e^{-1,91v},$$

где  $v$  — скорость ветра;  $e = 2,718$  — основание логарифма.

На рисунке 23 представлены результаты расчета.

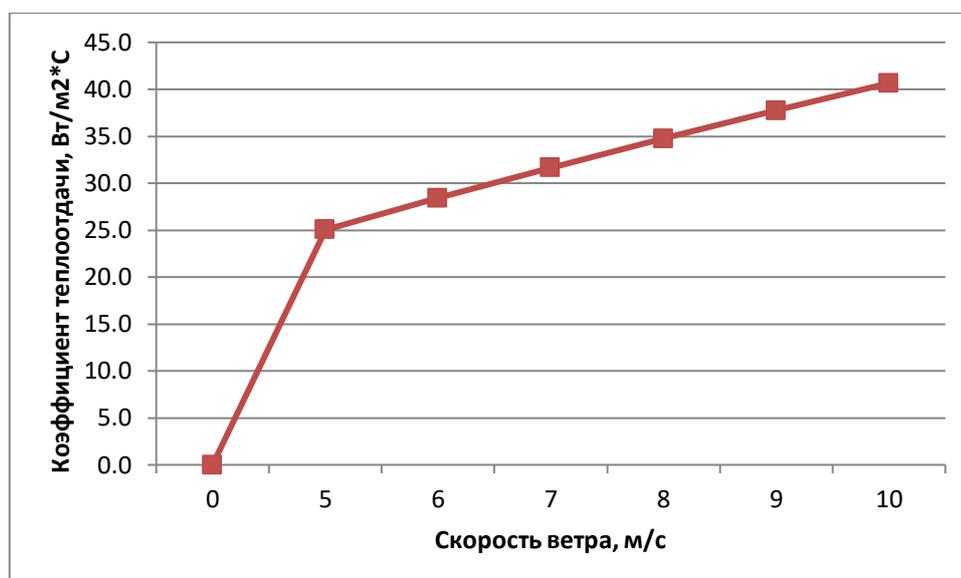


Рисунок 23 – Зависимость коэффициента теплоотдачи наружной поверхности кирпичной стены от скорости ветра

Из результатов расчетов следует, что при скорости ветра 10 м/с происходит существенное перераспределение тепловых полей в ограждающей конструкции.

Таким образом, при проектировании теплозащитных свойств ограждающих конструкций по приведенному сопротивлению теплопередаче, особенно в районах с низкой температурой зимой и сильными ветрами, необходимо учитывать интенсивность теплообмена на наружной поверхности ограждающей конструкции.

Вывод: в данной главе были выведены и построены графики зависимости плотности теплового потока ограждающей конструкции и температуры ее поверхности при нестационарных условиях. По результатам можно увидеть, что учитывая нестационарный режим теплопередачи ограждающей конструкции можно приблизить результаты расчетов к натурным условиям, что поможет скорректировать область применения теплоизоляционного материала ограждающей конструкции, сделать рациональный выбор материала.

#### **4 Оценка экономической эффективности теплоизоляции ограждающих конструкций гражданских зданий при нестационарных условиях в зависимости от изменения величины теплопроводности теплоизоляционного материала с учетом затрат на тепловую энергию**

Мероприятия, направленные на сокращение потерь тепла и повышение уровня тепловой защиты наружных ограждающих конструкций всегда требовали экономического обоснования. Окупаемость таких мероприятий исследовали Богуславский Л.Д., Гагарин В.Г., Самарин О.Д. и др. [54–66].

Богуславский Л.Д. предложил модель, которая позволяла оценить «экономически целесообразное», «оптимальное» сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций. В его методах величины единовременных вложений на создание 1 кв.м. ограждающей конструкции и годовые затраты на компенсацию теплопотерь через 1 кв.м. ограждающей конструкции выражаются в виде функций от термического сопротивления теплоизолирующего слоя, который является независимой переменной. В его модели находится значение этой переменной, при котором производная приведенных затрат (затраты на производство и эксплуатацию ограждающих конструкций) равна нулю, это значение сопротивления теплопередаче и считается «экономически целесообразным» [56].

Савин В.К. привел энергограмму зависимости расхода энергии на создание конструкции, затраты на эксплуатацию а также их суммарные затраты, представленные в безразмерно виде, от уровня теплозащиты ограждений. На его энергограмме присутствует точка, в которой суммарные затраты энергии при оптимальном уровне теплозащиты ограждения, имеют наименьшее оптимальное значение. Путем такой процедуры можно отобрать самые энергоэффективные материалы, конструкции и изделия и здания в целом [57].

Езерский В.А., Монастырев П.В., Клычников Р.Ю. в своих работах определили предельный срок службы здания, при котором его

термомодернизация будет безубыточна. Согласно их модели оценить эффективность в энергозащите конкретного здания можно сравнив период их окупаемости (лет), определяемый с учетом дисконтирования доходов, с оставшимся сроком службы здания (лет) с момента реализации теплозащитных мероприятий. Равенство выше названных величин подразумевают, что мероприятия по термомодернизации как минимум окупятся [58].

Самарин О. Д., используя методики, разработанные специалистами, членами НП «АВОК», рассматривал эффективность вложений в энергосберегающие мероприятия. В своих работах он определил влияние изменения климата на окупаемость дополнительного утепления не светопрозрачных ограждений и выявил, что наблюдаемая в последнее время тенденция к потеплению климата дает дополнительные доводы к необоснованности чрезмерного повышения теплозащитных свойств ограждающих конструкции [59].

Наиболее последовательный и разумный подход разработан Гагариным В.Г., Он предложил усовершенствованную математическая модель условий окупаемости затрат на повышение уровня тепловой защиты, которая учитывала еще и о дисконтирование экономии эксплуатационных затрат. Согласно его модели, важнейшим параметром, определяющим экономические условия повышения тепловой защиты ограждений в стране или регионе, является предельное значение для единовременных затрат. В своих работах В.Г. Гагарин сравнил значение процентных ставок, а также градусо–суток отопительного периода и цены на тепловую энергию в городах РФ и странах ЕС и СНГ и выявил, что условия для повышения тепловой защиты зданий в России менее благоприятны, чем в развитых странах [60–63].

По разности теплопотерь находят годовую стоимость сэкономленной тепловой энергии. Зная затраты на термомодернизацию наружных стен и стоимость сэкономленной энергии на отопление, находится экономический

эффект от утепления, который выражается в сроке окупаемости. Несмотря на общность подходов к определению экономической эффективности термомодернизации наружных стен, в анализируемых работах приводятся существенно различающиеся результаты экономических расчетов.

С учетом выявленных причин расхождения результатов построена экономическая модель для оценки эффективности термомодернизации наружных стен зданий рассмотрено несколько вариантов дополнительного утепления ограждающих конструкций.

Возвращаясь к экономической стороне вопроса теплопотерь через ограждающие конструкции при нестационарных условиях с целью повышения энергоэффективности решения по каждому варианту произведены экономические расчеты по количеству затрачиваемой энергии на обогрев  $1 \text{ м}^2$  поверхности стены.

Анализ энергоэффективности предложенных вариантов конструктивного решения ограждающих конструкций принято сравнивать не только по стоимости материалов применяемых при теплоизоляции ограждающей конструкции, но и по количеству затраченной энергии необходимой для поддержания температуры поверхности внутреннего контура помещения при эксплуатации в пределах нормативных температурных значений. Сводная таблица плотности теплового потока ограждающих конструкций за 1 час для внутреннего контура ограждающей конструкции на  $1 \text{ м}^2$  при нестационарном режиме представлена в таблице 17.

Теплопроводность теплоизоляционного материала при нестационарных условиях зависит от погодных условий. Наглядно это продемонстрировано в таблице 16.

Таблица 16 – Зависимость теплопроводности пенополистерола от наружной температуры воздуха

Теплопроводность материала, Вт/°С •м	Температура воздуха, °С
0,3	-37

Окончание таблицы 16

Теплопроводность материала, Вт/°С·м	Температура воздуха, °С
0,2	-20
0,1	-10
0,03	0
0,03	10
0,03	20
0,03	30

Граничные условия: наименьшая температура наружного воздуха  $T_H = -37\text{ °С}$ ; температура воздуха внутри помещения  $T_{BH} = 20\text{ °С}$

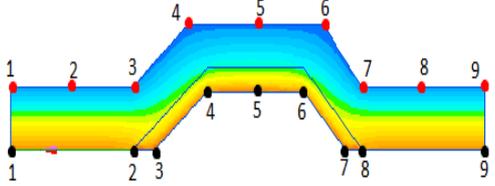
Таблица 17 – Сводная таблица плотности теплового потока ограждающих конструкций за 1 час для внутреннего контура ограждающей конструкции на  $1\text{ м}^2$  при нестационарном режиме

№	Название	Схема	Средняя плотность теплового потока по внутреннему контуру, Вт/м <sup>2</sup>
1	Схема распределения температуры по наружной и внутренней поверхности здания и теплового потока в кирпичной стене без утеплителя		114,85
2	Схема распределения температуры по наружной и внутренней поверхности здания и теплового потока в кирпичной стене с наружным утеплением (пенополистирол)		68,22

Продолжение таблицы 17

№	Название	Схема	Средняя плотность теплового потока по внутреннему контуру, Вт/м <sup>2</sup>
3	Схема распределения температуры по наружной и внутренней поверхности здания и теплового потока в кирпичной стене с наружным утеплением (пенополистирол)		47,71
4	Схема распределения температуры по наружной и внутренней поверхности здания и теплового потока в кирпичной стене с наружным утеплением (пенополистирол)		42,04
5	Схема распределения температуры по наружной и внутренней поверхности здания и теплового потока в кирпичной стене с наружным утеплением (пенополистирол)		38,24
6	Схема распределения температуры по наружной и внутренней поверхности здания и теплового потока в кирпичной стене с наружным утеплением (пенополистирол)		37,31

Окончание таблицы 17

№	Название	Схема	Средняя плотность теплового потока по внутреннему контуру, Вт/м <sup>2</sup>
7	Схема распределения температуры по наружной и внутренней поверхности здания и теплового потока в кирпичной стене с утеплителем внутри здания(пенополистирол)		70,21

В международной системе единиц (СИ)  $1 \text{ Вт/м}^2 = 0,86 \text{ Ккал/ч}$ .

Необходимое количество затраченной энергии для нагрева ( $1^\circ\text{C} = 0,001 \text{ Гкал}$ ) и подачи  $1 \text{ м}^3$  воды в систему ГВС для г. Абакан составляет  $0,0755 \text{ Гкал}$  ( $1 \text{ Гкал} = 1000000 \text{ Ккал}$ ). Цена для пользователей  $\text{Гкал}$  на (февраль 2019г.) для г. Абакана составляет  $1298,53 \text{ р}$ .

Исходя из данных теплового потока таблицы 17 был произведен расчет необходимого количества энергии затрачиваемой на поддержание  $T_{\text{вн}} = 20^\circ\text{C}$  внутри эксплуатируемых помещений в зимний период.

Количество затраченной энергии тепла для поддержания  $T_{\text{вн}} = 20^\circ\text{C}$  (**вариант 1**) на  $1 \text{ м}^2$  внутреннего контура стены составляет:

1 час:  $114,85 \cdot 0,86 = 98,77 \text{ Ккал/час}$

1 сутки:  $98,77 \cdot 24 = 2370,5 \text{ Ккал/сут.}$

1 месяц (31 день):  $2370,5 \cdot 31 = 73485,62 \text{ Ккал/мес.}$

Для наибольшей удобства дальнейших расчетов переведем  $\text{Ккал}$  в  $\text{Гкал}$ :  $1 \text{ Гкал} = 1000000 \text{ Ккал}$

$73485,62 / 1000000 = 0,073 \text{ Гкал/мес.}$

Итоговая стоимость (руб) затраченной энергии тепла для поддержания  $T_{\text{вн}} = 20^{\circ}\text{C}$  на  $1 \text{ м}^2$  внутреннего контура стены в месяц составляет:

$$0,073 \cdot 1298,53 = 95,4 \text{ р/мес.}$$

По аналогии произвели расчет количества затраченной энергии тепла для поддержания  $T_{\text{вн}} = 20^{\circ}\text{C}$  для остальных вариантов ограждающих конструкций.

Количество затраченной энергии тепла для поддержания  $T_{\text{вн}} = 20^{\circ}\text{C}$  (**вариант 2**) на  $1 \text{ м}^2$  внутреннего контура стены составляет:

$$1 \text{ час: } 68,22 \cdot 0,86 = 58,67 \text{ Ккал/час}$$

$$1 \text{ сутки: } 58,67 \cdot 24 = 1408 \text{ Ккал/сут.}$$

$$1 \text{ месяц (31 день): } 1408 \cdot 31 = 43648 \text{ Ккал/мес.}$$

Для наибольшей удобства дальнейших расчетов переведем Ккал в Гкал:  $1 \text{ Гкал} = 1000000 \text{ Ккал}$

$$43648 / 1000000 = 0,044 \text{ Гкал/мес.}$$

Итоговая стоимость (руб) затраченной энергии тепла для поддержания  $T_{\text{вн}} = 20^{\circ}\text{C}$  на  $1 \text{ м}^2$  внутреннего контура стены в месяц составляет:

$$0,044 \cdot 1298,53 = 56,68 \text{ р/мес.}$$

Количество затраченной энергии тепла для поддержания  $T_{\text{вн}} = 20^{\circ}\text{C}$  (**вариант 3**) на  $1 \text{ м}^2$  внутреннего контура стены составляет:

$$1 \text{ час: } 47,71 \cdot 0,86 = 41 \text{ Ккал/час}$$

$$1 \text{ сутки: } 41 \cdot 24 = 984 \text{ Ккал/сут.}$$

$$1 \text{ месяц (31 день): } 984 \cdot 31 = 30504 \text{ Ккал/мес.}$$

Для наибольшей удобства дальнейших расчетов переведем Ккал в Гкал:  $1 \text{ Гкал} = 1000000 \text{ Ккал}$

$$30504 / 1000000 = 0,03 \text{ Гкал/мес.}$$

Итоговая стоимость (руб) затраченной энергии тепла для поддержания  $T_{\text{вн}} = 20^{\circ}\text{C}$  на  $1 \text{ м}^2$  внутреннего контура стены в месяц составляет:

$$0,03 \cdot 1298,53 = 38,9 \text{ р/мес.}$$

Количество затраченной энергии тепла для поддержания  $T_{\text{вн}} = 20^{\circ}\text{C}$  (**вариант 4**) на  $1 \text{ м}^2$  внутреннего контура стены составляет:

$$1 \text{ час: } 42,04 \cdot 0,86 = 36,15 \text{ Ккал/час}$$

$$1 \text{ сутки: } 41 \cdot 24 = 867,7 \text{ Ккал/сут.}$$

$$1 \text{ месяц (31 день): } 867,7 \cdot 31 = 26898,8 \text{ Ккал/мес.}$$

Для наибольшей удобства дальнейших расчетов переведем Ккал в Гкал:  $1 \text{ Гкал} = 1000000 \text{ Ккал}$

$$26898,8 / 1000000 = 0,027 \text{ Гкал/мес.}$$

Итоговая стоимость (руб) затраченной энергии тепла для поддержания  $T_{\text{вн}} = 20^\circ\text{C}$  на  $1 \text{ м}^2$  внутреннего контура стены в месяц составляет:

$$0,027 \cdot 1298,53 = 34,93 \text{ р/мес.}$$

Количество затраченной энергии тепла для поддержания  $T_{\text{вн}} = 20^\circ\text{C}$  (**вариант 5**) на  $1 \text{ м}^2$  внутреннего контура стены составляет:

$$1 \text{ час: } 38,24 \cdot 0,86 = 32,88 \text{ Ккал/час}$$

$$1 \text{ сутки: } 32,88 \cdot 24 = 789,3 \text{ Ккал/сут.}$$

$$1 \text{ месяц (31 день): } 789,3 \cdot 31 = 24467,48 \text{ Ккал/мес.}$$

Для наибольшей удобства дальнейших расчетов переведем Ккал в Гкал:  $1 \text{ Гкал} = 1000000 \text{ Ккал}$

$$24467,48 / 1000000 = 0,024 \text{ Гкал/мес.}$$

Итоговая стоимость (руб) затраченной энергии тепла для поддержания  $T_{\text{вн}} = 20^\circ\text{C}$  на  $1 \text{ м}^2$  внутреннего контура стены в месяц составляет:

$$0,024 \cdot 1298,53 = 31,16 \text{ р/мес.}$$

Количество затраченной энергии тепла для поддержания  $T_{\text{вн}} = 20^\circ\text{C}$  (**вариант 6**) на  $1 \text{ м}^2$  внутреннего контура стены составляет:

$$1 \text{ час: } 37,31 \cdot 0,86 = 32,08 \text{ Ккал/час}$$

$$1 \text{ сутки: } 32,08 \cdot 24 = 770,1 \text{ Ккал/сут.}$$

$$1 \text{ месяц (31 день): } 770,1 \cdot 31 = 23873,1 \text{ Ккал/мес.}$$

Для наибольшей удобства дальнейших расчетов переведем Ккал в Гкал:  $1 \text{ Гкал} = 1000000 \text{ Ккал}$

$$23873,1 / 1000000 = 0,023 \text{ Гкал/мес.}$$

Итоговая стоимость (руб) затраченной энергии тепла для поддержания  $T_{\text{вн}} = 20^\circ\text{C}$  на  $1 \text{ м}^2$  внутреннего контура стены в месяц составляет:

$$0,023 \cdot 1298,53 = 29,86 \text{ р/мес.}$$

Количество затраченной энергии тепла для поддержания  $T_{\text{вн}} = 20^{\circ}\text{C}$  (вариант 7) на  $1 \text{ м}^2$  внутреннего контура стены составляет:

$$1 \text{ час: } 70,21 \cdot 0,86 = 60,38 \text{ Ккал/час}$$

$$1 \text{ сутки: } 32,08 \cdot 24 = 1449,1 \text{ Ккал/сут.}$$

$$1 \text{ месяц (31 день): } 1449,1 \cdot 31 = 44922,7 \text{ Ккал/мес.}$$

Для наибольшей удобства дальнейших расчетов переведем Ккал в Гкал:  $1 \text{ Гкал} = 1000000 \text{ Ккал}$

$$44922,7 / 1000000 = 0,045 \text{ Гкал/мес.}$$

Итоговая стоимость (руб) затраченной энергии тепла для поддержания  $T_{\text{вн}} = 20^{\circ}\text{C}$  на  $1 \text{ м}^2$  внутреннего контура стены в месяц составляет:

$$0,045 \cdot 1298,53 = 58,33 \text{ р/мес.}$$

Результаты полученных расчетов сведены в таблицу 18.

Таблица 18 – Результаты расчетов затраченной энергии тепла на  $1 \text{ м}^2$  ограждающей конструкции в денежном эквиваленте, руб.

Вариант	Итоговая стоимость затраченной энергии тепла для поддержания $T_{\text{вн}} = 20^{\circ}\text{C}$ на $1 \text{ м}^2$ внутреннего контура стены в месяц, руб.	Единовременные затраты на теплоизоляционный материал на $1 \text{ м}^2$ , руб.
1	95,4	–
2	56,68	185
3	38,9	
4	34,93	
5	31,16	
6	29,86	
7	58,33	

Вывод: В результате расчетов затраченной энергии тепла на  $1 \text{ м}^2$  в месяц ограждающей конструкции можно отследить тенденцию, что применение теплоизоляционного материала (в данном случае – пенополистерол) с захлестом на 10 мм по внешнему контуру ограждающей

конструкции сокращает денежные затраты на поддержание  $T_{\text{вн}} = 20^{\circ}\text{C}$  на 56,5 руб/мес. Учитывая, что единовременная затрата на приобретение теплоизоляционного материала за  $1\text{м}^2$  равна 185 рублям, то разница в денежном эквиваленте эксплуатации ограждающей конструкции без утепления по внешнему контуру здания и с утеплением по внешнему контуру здания (56,5 руб/мес) окупится через 3 месяца.

## Список использованных источников

1. Ватин Н.И. и др. Влияние уровня тепловой защиты ограждающих конструкций на величину потерь тепловой энергии в здании / Н.И. Ватин и др. // Инженерно–строительный журнал. – 2012. – № 8. – С. 4–14.
2. СП 50.13330.12 Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23–02–2003 – Москва : ФАУ «ФЦС», 2012. – 95 с.
3. Кнатько М.В. и др. К вопросу о долговечности и энергоэффективности современных ограждающих стеновых конструкций жилых, административных и производственных зданий / М.В. Кнатько и др. // Инженерно–строительный журнал. – 2008. – № 2. – С. 50–53.
4. National Building Code of Finland Part D3 Ministry of the Environment Decree on building designers and plans – Helsinki : 2002.
5. Шубин И.Л., Спиридонов А.В. Законодательство по энергосбережению в США, Европе и России. Пути решения / И.Л. Шубин, А.В.Спиридонов // Вестник МГСУ, – 2011. – Т. 1, № 3. – С. 4–14.
6. Пат. 2295622 Российская Федерация Вентилируемое окно / Т.А. Ахмяров. Заявл. 14.03.2005. Оpubл. 20.03.07. Бюл. № 8.
7. Егорова Т. С., Черкас В. Е. Повышение энергоэффективности зданий благодаря устранению критических мостиков холода и непрерывной изоляции выступающих строительных конструкций / Т.С. Егорова, В.Е. Черкас // Вестник МГСУ, – 2011, № 3–1.
8. Матросов Ю.А., Энергоэффективность и экология – основа современных требований к теплозащите зданий / Ю.А. Матросов // Строительные науки, – 2009, № 5. – С. 283–290
9. Кононова М.С., Сороченкова Е.Ю., Смирнова Н.Н. Исследование тепlopоступлений от солнечной радиации для жилых зданий в зависимости от ориентации по сторонам света / М.С. Кононова, Е.Ю. Сороченкова, Н.Н. Смирнова // Студент и наука, – 2016, №. 9. – С. 33–37.

10. Гордеева Т.Е. Улучшение тепловлажностного режима жилого помещения / Т.Е. Гордеева, Д.В. Зеленцов // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура, – 2013, № 2 (10). – С. 94–96.

11. Голованова Л.А. Основные аспекты территориального энергосбережения : учебное пособие / Л.А. Голованова. – Хабаровск : Издательство Хабаровского Государственного Технического Университета, 2002. – 115 с.

12. Коваленко П.П., Орлова Л.Н. Городская климатология : учебное пособие для вузов / П.П. Коваленко, Л.Н. Орлова. – Москва : Стройиздат, 1993. – 144 с.

13. Физико–технические и конструктивно–технологические основы термомодернизации ограждающих конструкций жилых зданий (на примере Центрально–Черноземного региона) [Текст] : автореф. дис. д–ра техн. наук : 05.23.01 / П.В. Монастырев. – М., 2005. – 43 с. : ил. – Библиогр. : с. 39–43

14. Тихомиров С.А. Нестационарные процессы теплопереноса через ограждающие конструкции: монография / С.А. Тихомиров, В.В. Иванов. – Ростов–на Дону: ФГБОУ ВПО Ростовский государственный строительный университет, 2014. – 117с.

15. Основные положения энергетической стратегии России на период до 2020 года: Прил. к обществ.–дел. журн. “Энергетическая политика”. – М.: ГУ ИЭС, 2001. – 120 с.

16. Кононова М.С. Исследование влияния некоторых геометрических параметров зданий на их теплоэнергетические показатели [Текст] / М.С. Кононова // Изв. вузов. Строительство. – 2010. – № 9. – С. 60–64.

17. Васильев Б.Ф. Натурные исследования температурно–влажностного режима жилых зданий / Б.Ф.Васильев – М.: Госуд. изд–во литературы по строительству и архитектуре. – 1957. – 215 с.

18. Власов О.Е. Долговечность ограждающих и строительных конструкций / О.Е. Власов – М. : НИИСФ. – 1963. – 116 с.

19. В.Н. Богословский Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха) : Учебник для вузов / В.Н. Богословский – М. : Книга по Требованию, 2013. – 416 с.

20. Вавилов В.П., Маринетти С., Нестерук Д.А. Тепловизионная оценка сопротивления теплопередаче строительных конструкций в нестационарных условиях //Дефектоскопия. – 2009. – №. 7. – С. 50–61.

21. Киселева Е.Г., Мягков М.С. Теплотехнический расчет ограждающих конструкций жилых и общественных зданий : учебно-методическое пособие к курсовой расчётно-графической работе по архитектурной климатологии. Для студентов, обучающихся по специальности «Архитектура» И «Дизайн архитектурной среды». – М. : МАРХИ, 2016. – 36 с.

22. Комплексный тепловой контроль и дефектометрия качества строительства административных и жилых строительных сооружений / О. Н. Будадин, Д. В. Киржанов, О. В. Лебедев и др. // Матер. 14 межд. конф. «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики». – Ялта, 16–20 окт. 2006. – С. 96–104.

23. ГОСТ Р. 56542–2015 Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов // М. : Стандартинформ. – 2015.

24. ГОСТ 25380–2014 Здания и сооружения. Метод измерения плотности тепловых потоков, проходящих через ограждающие конструкции

25. ВСН 4–3–96 Ведомственные строительные нормы по теплотехническим обследованиям наружных ограждающих конструкции зданий с применением малогабаритного тепловизора

26. Теплотехнический расчет наружных ограждающих конструкций: методические указания / А.С. Самохвалов И.В. Головных. – Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та., 2013. – 38 с.

27. Фокин В.М., Ковылин А.В., Чернышов В.Н. Энергоэффективные методы определения теплофизических свойств строительных материалов и изделий. – М. : Издательский дом «Спектр», 2011. – 156 с.

28. Фокин В. М. Основы энергосбережения и энергоаудита. – М. : Издательство «Машиностроение–1», 2006. – 256 с.

29. Будадин О.Н., Абрамова Е.В., Слитков М.Н. Методика диагностики и энергетических обследований наружных ограждающих конструкций строительных сооружений тепловизионным бесконтактным методом. Свидетельство об аттестации Госстандарта России № 09/442–2001 от 09.07.2001 г. – 41 с

30. Методика диагностики и энергетических обследований наружных ограждающих конструкций строительных сооружений тепловизионным бесконтактным методом (летний вариант) / О.Н. Будадин, Е.В. Абрамова, О. С. Крутогорov и др. – Свидетельство об аттестации Госстандарта России № 09/442–2002 от 09.08.2002 г. – 41 с.

31. Стороженко В. А., Малик С. Б. Экспресс–метод оценки теплопотерь в зданиях путем термографического обследования // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2007.

32. Перехоженцев А.Г., Груздо И.Ю. Влияние климатических воздействий на температурно–влажностное состояние поверхностных слоев многослойных наружных ограждающих конструкций зданий // Международный научно–исследовательский журнал. – 2016. – №. 4 (46) Часть 2. – С. 143–149.

33. Stefan J. Uber einige Probleme der Theorie der Warmeleitung // S.–B. Wien.Akad. Mat. Natur. 1889. V. 98. P. 173–484

34. Пастушков П.П. и др. Расчетное определение эксплуатационной влажности автоклавного газобетона в различных климатических зонах строительства // Вестник МГСУ. – 2015. – №. 2.

35. ГОСТ Р 56511–2015 Контроль неразрушающий. Методы теплового вида. Общие требования

36. СНиП 23–02–2003 Тепловая защита зданий (действующая редакция)

37. ГОСТ 9573–2012 Плиты из минеральной ваты на синтетическом связующем теплоизоляционные. Технические условия
38. Войлоков И.А. Перспективы развития рынка теплоизоляционных материалов // Сборник трудов. – 2009. – С. 26.
39. Горшков А.С. Энергоэффективность в строительстве: вопросы нормирования и меры по снижению энергопотребления зданий // Инженерно–строительный журнал. – 2010. – №. 1. – С. 9–13.
40. Береговой А.М. Ограждающие конструкции с повышенными теплозащитными качествами : Учебное пособие. – Пенза: Пензенский архитектурно–строительный институт, 1995. – 315 с.
41. Зиневич Л.В. Решение задач строительства с использованием программного пакета ELCUT // Строительство – формирование среды жизнедеятельности. Сборник научных трудов XIV международной межвузовской научно–практической конференции молодых учёных, докторантов и аспирантов. – 2011. – М.: МГСУ. 2011. – с. 47–51. – 864 с.
42. Королева М.А., Аузинь И.А., Беляков В.А. Экономические аспекты решения теплотехнических проблем в современном строительстве // Проблемы и перспективы экономического развития России: инновации, финансирование, управление производством. – Екатеринбург, 2004. – с.270–272
43. ГОСТ 30494–2011. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях. – М.: Госстрой России, ГУП ЦПП, 2013.
44. СП131.13330.2012 Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23–01–99•
45. Ильинский В.М. Строительная теплофизика (ограждающие конструкции и микроклимат зданий): учеб. пособие для инженерно–строительных вузов. – М. : Высшая школа, 1974.
46. СП 23–101–2004 Проектирование тепловой защиты зданий / Госстрой России. – М. : ФГУП ЦПП, 2004.
47. Богословский В.Н. Тепловой режим здания. – М.: Стройиздат, 1979.

48. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий / Под ред. Ю.А. Табунщикова, В.Г. Гагарина. – 5-е изд., пересмотр. – М.: АВОК–ПРЕСС, 2006. –256 с.
49. Власов О.Е. Основы строительной теплотехники // М. : ВИА РККА. – 1938.
50. Ананьев А.И., Хоров О.А., Евсеев Л.Д., Ухова Т.А., Ярмаковский В.Н. Теплотехнические показатели строительных материалов и конструкций // Строительный эксперт. – 2005. – №16(203). – С. 17–23.
51. Зоколей С.В. Архитектурное проектирование, эксплуатация объектов, их связь с окружающей средой. – М. : Стройиздат, 1984. – 670 с.
52. Р.Е. Брилинг Исследование морозостойкости строительных материалов в наружных ограждениях. /Р.Е. Брилинг // Исследования по строительной физике / ЦНИИПС. – М.–Л. – 1951. – с. 60.
53. Stefan J. Uber einige Probleme der Theorie der Warmeleitung// S.–В. . Wien. Akad. Mat. Natur. 1889. V. 98. P. 173–484
54. Леденев В.И., Матвеева И.В. Физико–технические основы эксплуатации наружных кирпичных стен гражданских зданий : Учеб. пособие – Тамбов: Изд–во ТГТУ, 2005 —160 с.
55. Федеральный закон "Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации" от 23.11.2009 N 261–ФЗ (последняя редакция)
56. Богуславский Л. Д. Снижение расхода энергии при работе систем отопления, вентиляции и кондиционирования. – Стройиздат, 1982.
57. Савин В. К. Упрощенная модель минимизации расхода суммарной энергии, идущей на строительство и эксплуатацию зданий // Academia. Архитектура и строительство. – 2010. – №. 1.
58. Езерский В.А., Монастырев П.В., Клычников Р.Ю. Методика определения предельного срока службы здания, обеспечивающего

безубыточность его термомодернизации // Academia. Архитектура и строительство. – 2010. – №. 3.

59. Самарин О.Д. О влиянии изменения климата на окупаемость дополнительного утепления не светопрозрачных ограждений // Academia. Архитектура и строительство. – 2009. – №. 5.

60. Гагарин В.Г. Экономический анализ повышения уровня теплозащиты ограждающих конструкций зданий. Сборник «Труды I Всероссийской научно – технической конференции». 2008. С. 24 – 62.

61. Гагарин В.Г. и др. Теплозащита наружных стен зданий с облицовкой из кирпичной кладки // АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. – 2009. – №. 5. – С. 48–56.

62. Гагарин В. Г. Экономический анализ повышения уровня теплозащиты ограждающих конструкций зданий // Строительные материалы. – 2008. – №. 8. – С. 41–47.

63. Гагарин В. Г., Козлов В. В. Теоретические предпосылки расчета приведенного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций // Строительные материалы. – 2010. – №. 12. – С. 4–12.

64. Горшков А. С. и др. Методика расчета окупаемости инвестиций по реновации фасадов существующих зданий // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2014. – №. 2. – С. 82–106.

65. Герасимова И.В., Адьяков Н.А., Мордасов В.А, Портнягин Д.Г. Программа комплексной оценки тепловой защиты здания с применением технологии легкого пенобетона «обжатие - релаксация» в условиях Республики Хакасия / И.В. Герасимова [и др.] // Агентство международных исследований. Концепции фундаментальных и прикладных научных исследований. Часть 3 – 2017. – С. 37-39.

66. Passive House model for quantitative and qualitative analyses and its intelligent system / Kaklauskas, A.a , Rute,J.a , Zavadskas, E.K.a , Daniunas, A.a ,

Pruskus, V.a , Bivainis, J.a , Gudauskas, R.b , Plakys, V.a. (2012)Energy and Buildings. Vol. 50. Pp. 7–18.

67. Reconstruction of administrative buildings of the 70's: The possibility of energy modernization / Nemova D.,Murgul V., Pukhkal V., Golik A., Chizhov E., Vatin N. (2014) Journal of applied engineering science. Vol. 12.Issue 1. Pp. 37–44

68. Beser E., Uysal H., Arkun Y. Casing for cold bridge-free air handling unit : пат. 6792722 США. – 2004.

69. Sheptak N. Thermal insulation : пат. 4284674 США. – 1981.

70. Reis B. Insulating structure having combined insulating and heat spreading capabilities : заяв. пат. 10861321 США. – 2005.

71. Gumerova E., Gamayunova O., Meshcheryakova T. Energy Efficiency Upgrading of Enclosing Structures of Mass Housing of the Soviet Union //Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport. – Springer, Cham, 2017. – С. 432-439.

72. Carr W. N. Convective inertial accelerometer with metamaterial thermal structure : заяв. пат. 15992134 США. – 2019.

73. Nomoto T. et al. Construction of a thermal conductivity measurement system for small single crystals of organic conductors //Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2019. – Т. 135. – №. 5. – С. 2831-2836.

74. Michiels P., Olivier R. Construction element for connecting thermally insulated parts of a building : заяв. пат. 16069466 США. – 2019.

75. Acharya P., Boggess B., Zhang K. Assessing heat stress and health among construction workers in a changing climate: A review //International journal of environmental research and public health. – 2018. – Т. 15. – №. 2. – С. 247.

76. Cui W. Application research of new energy-saving environment-friendly materials in architectural engineering //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2019. – Т. 479. – №. 1. – С. 012022.

77. Urzedowski A., Wojcicka-Migasiuk D. Applications of Thermal Visual Measurements in Light of Toughened Up Legislation //IOP Conference Series:

Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2019. – T. 471. – №. 9. – C. 092069.

78. Kosiński P., Wójcik R., Semen B. An experimental study on the deterioration of thermal insulation performance due to wind washing of the cavity insulation in leaky walls //Science and Technology for the Built Environment. – 2019. – №. just-accepted. – C. 1-13.

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
”СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ”

Хакасский технический институт – филиал СФУ  
кафедра ”Строительство”

Анализ и регулирование теплопередачи ограждающих  
конструкций зданий при нестационарных условиях в  
программном комплексе Elcut

Выпускник: Герасимова И.В.  
Научный руководитель: доцент, канд. техн. наук  
Портнягин Д.Г.

Абакан 2019

Цель работы: разработать научно–технические основы энергомимизации теплопотерь здания вследствие устранения геометрических и конструктивных мостиков холода ограждающих конструкций с учетом влияния природных факторов: солнечной радиации, скорости ветра, относительной влажности воздуха, осадков в Республике Хакасия.

Актуальность: заключается в анализе и разработке способов устранения теплопотерь через ограждающие конструкции здания при нестационарных условиях с сохранением эстетического восприятия здания.

Задачи:

1. Проведение анализа эффективности теплозащиты существующих конструктивных решений и поиск факторов, влияющих на уровень теплозащиты выступающих архитектурных элементов и ограждающих конструкций при нестационарных условиях;
2. Анализ конструктивных решений, минимизирующих теплопотери ограждающих конструкций;

3. Тепловизионный мониторинг в течение отопительного периода с целью выявить зависимость теплопотерь в нестационарных условиях от внешних условий среды;
4. Анализ плотности теплового потока и распределения температур в толще ограждающей конструкции с утеплением при стационарных и нестационарных условиях в программном комплексе Elcut
5. Расчет экономической эффективности рассчитанных вариантов теплоизоляции конструктивных узлов ограждающих конструкций

Научная новизна:

– выведена зависимость теплопотерь здания при нестационарных условиях от теплового потока внутри и снаружи ограждающей конструкции, с учетом погодных и климатических факторов на территории Республика Хакасия

– впервые проведена оценка экономической эффективности теплоизоляции ограждающих конструкций гражданских зданий при нестационарных условиях в зависимости от изменения величины теплопроводности теплоизоляционного материала, с учетом затрат на тепловую энергию

# Варианты теплоизоляции ограждающих конструкций

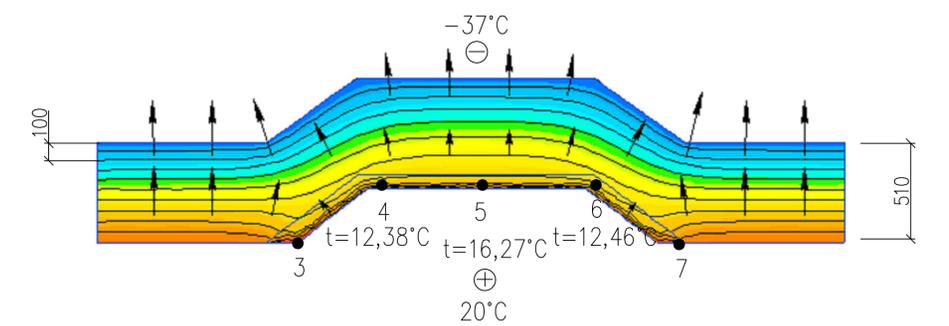
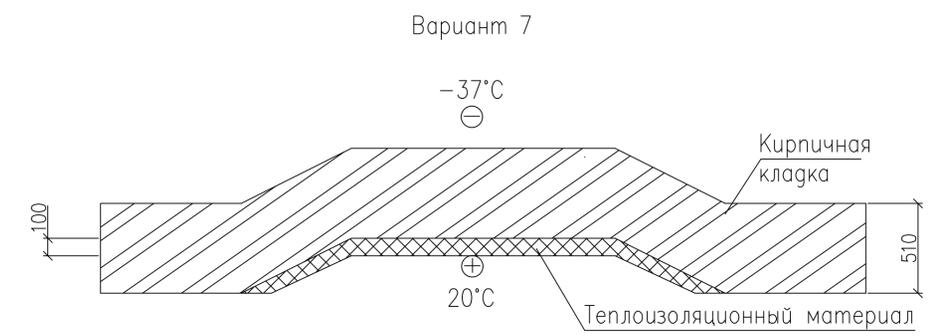
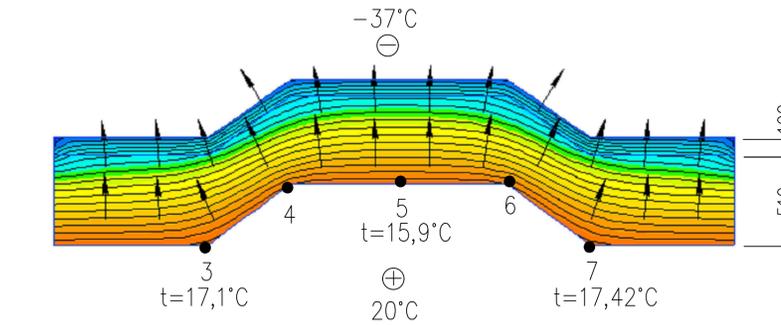
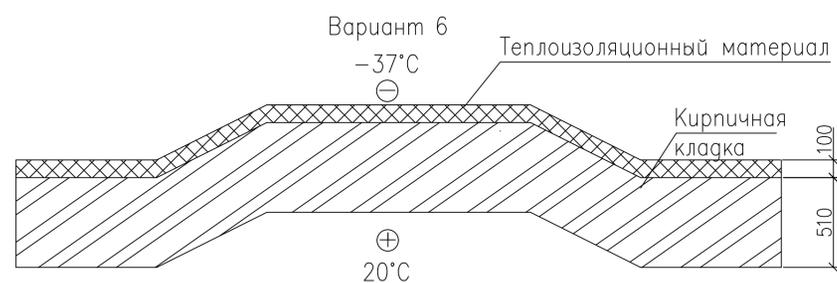
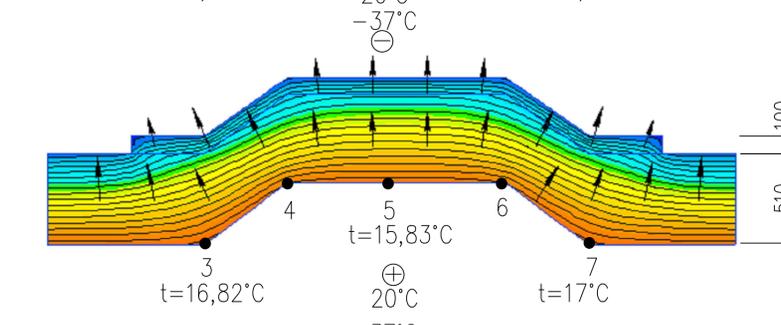
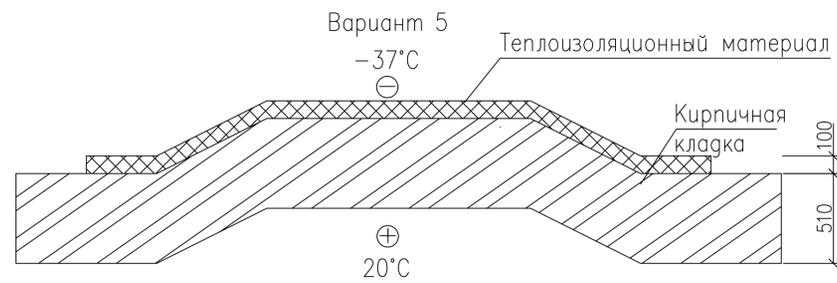
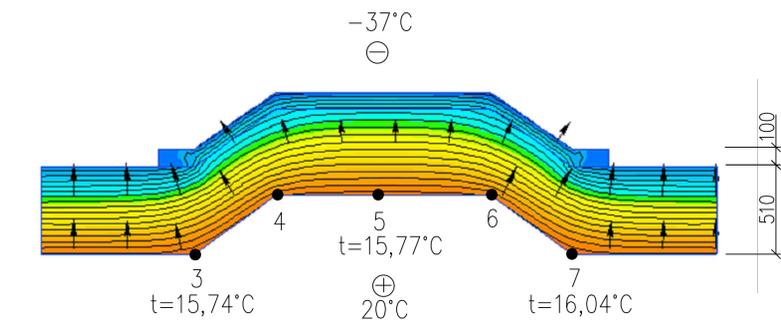
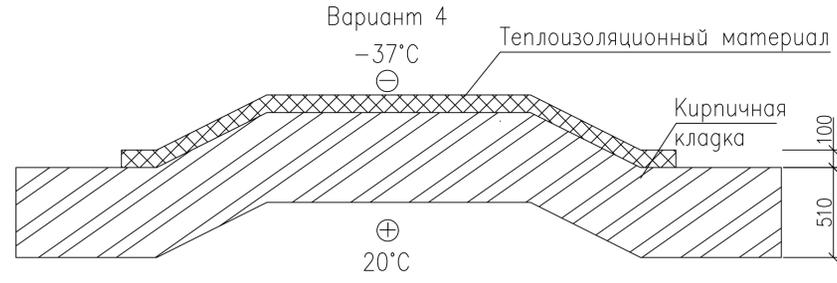
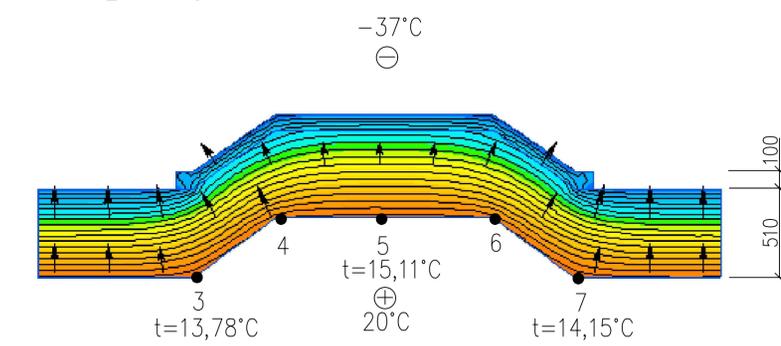
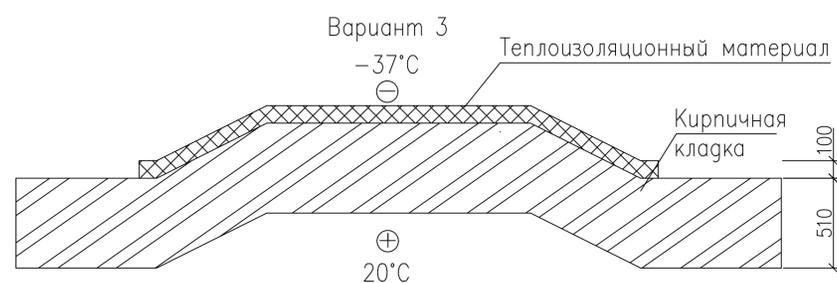
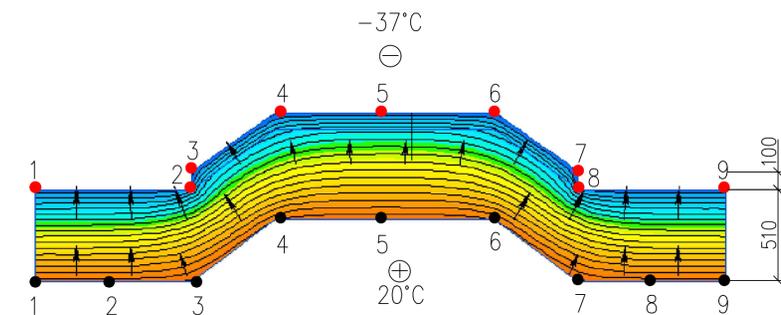
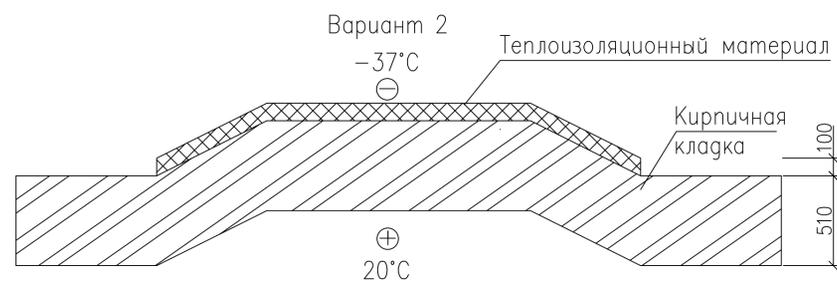
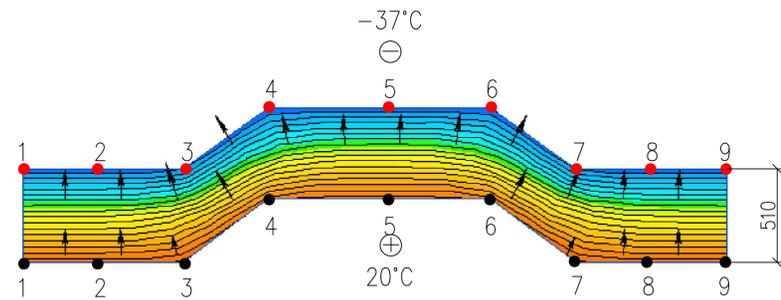
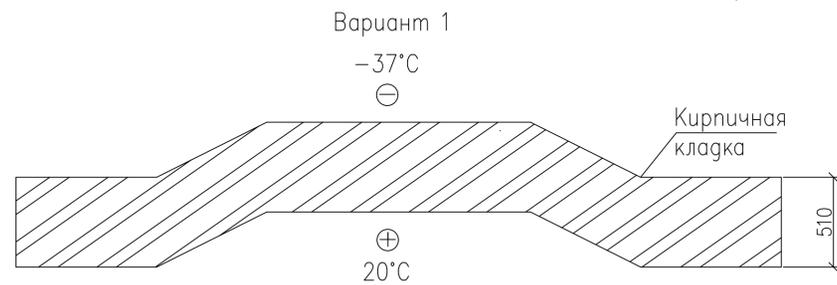
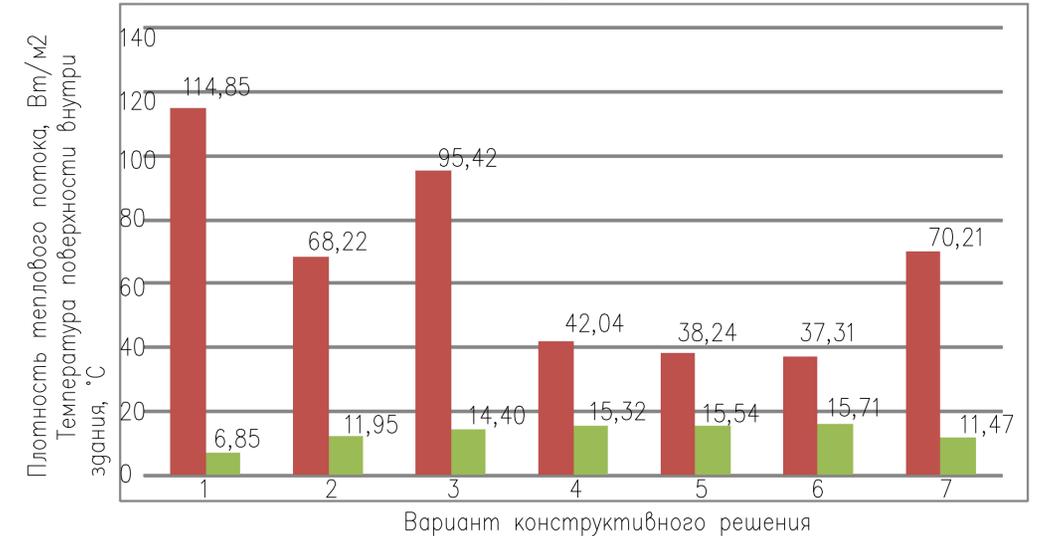


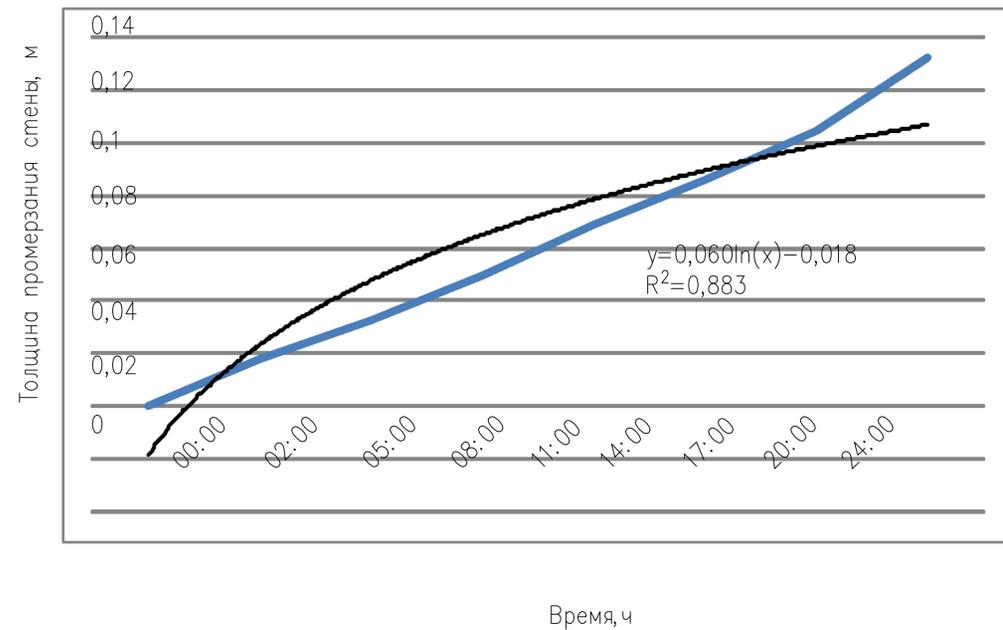
Диаграмма распределения плотности теплового потока и температуры поверхности ограждающей конструкции в зависимости от выбранного расположения теплоизоляционного материала относительно поверхности ограждающей конструкции



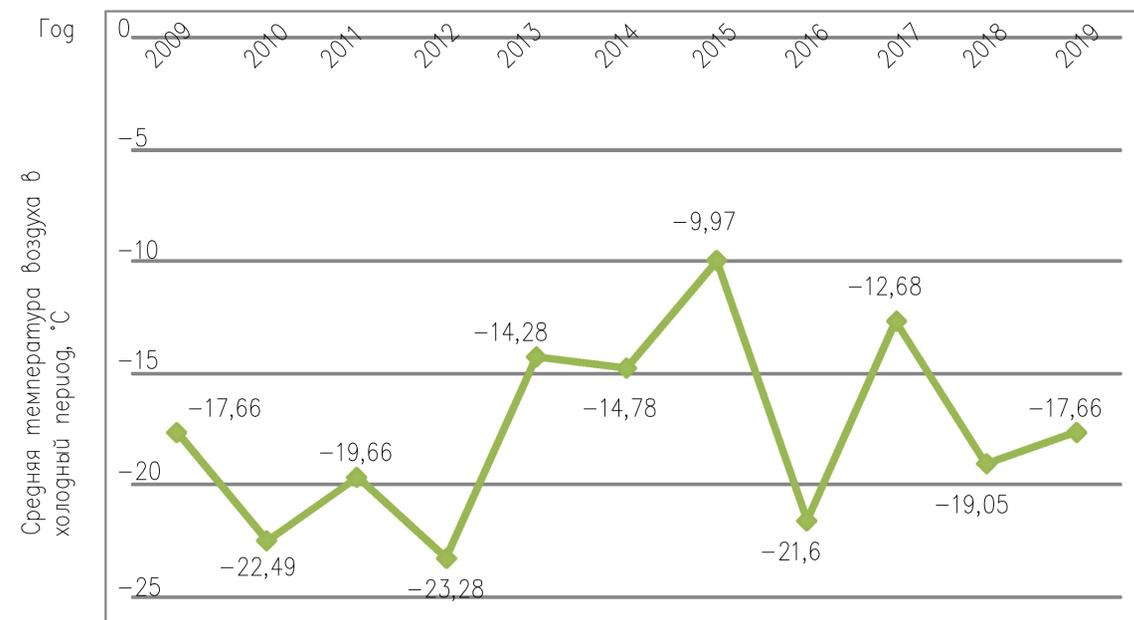
Вывод: проанализировав плотность теплового потока и температуру поверхности в узле примыкания утеплителя к кирпичной стене с последовательным увеличением величины захлеста утеплителя по контуру ограждающей конструкции на 10, 20, 40, 80 см было обнаружено, что величина захлеста не значительно влияет на вышеперечисленные показатели. Однако, плотность теплового потока ограждающей конструкции с захлестом 40 см теплоизоляционного материала на поверхность оказалась на 30% меньше, чем в конструктивном решении теплоизоляции ограждающей конструкции снаружи без захлеста на поверхность стены. Отсюда следует, что нет необходимости утеплять ограждающие конструкции по их длине.

Выпускник Герасимова И.В.  
 Научный руководитель: Портнягин Д.Г.

Зависимость толщины промерзания ограждающей конструкции от температуры наружного воздуха, меняющейся в течение 24 ч.

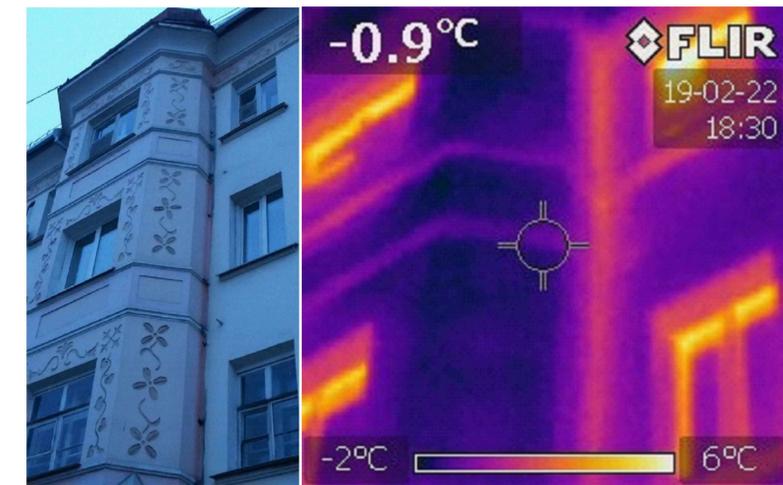


Среднестатистические результаты обработки климатических параметров по годам и усредненная кривая за 10 лет

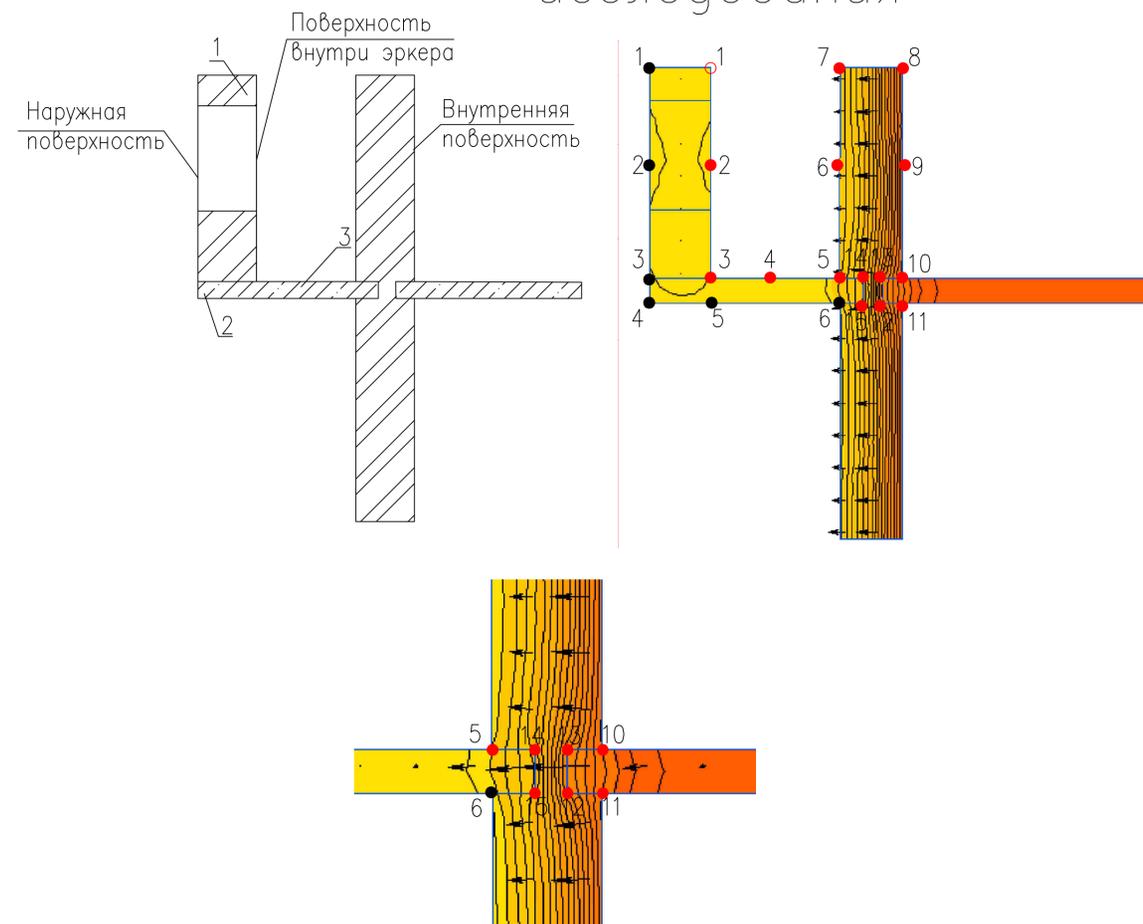


Вывод: на графике изображено хаотичное изменение температуры воздуха, это означает, что спрогнозировать среднюю температуру воздуха в холодный период следующие 10, 20 лет невозможно. Поэтому при проектировании ограждающих конструкций можно ориентироваться на значение средней температуры воздуха за холодный период в течение 10 лет, как минимум, который необходим при выборе теплоизоляционного материала.

Тепловизионная съемка мостика холода

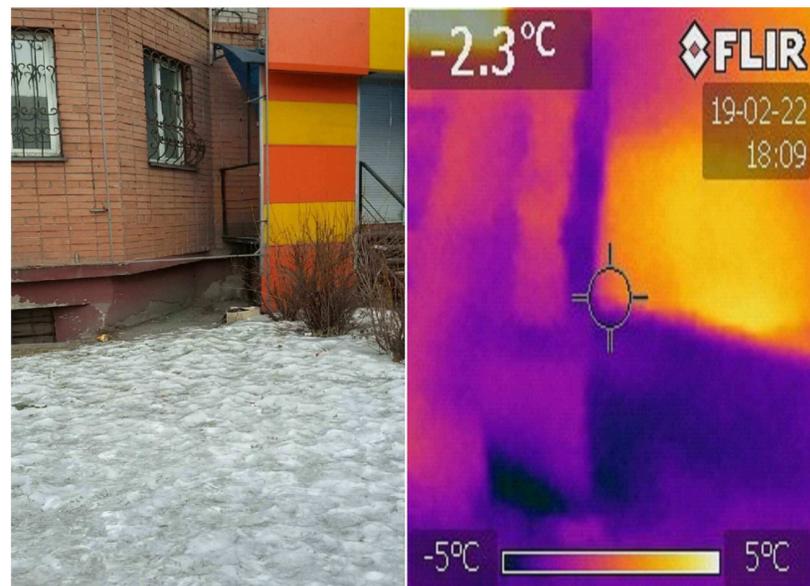


Термография по результатам проведенного исследования

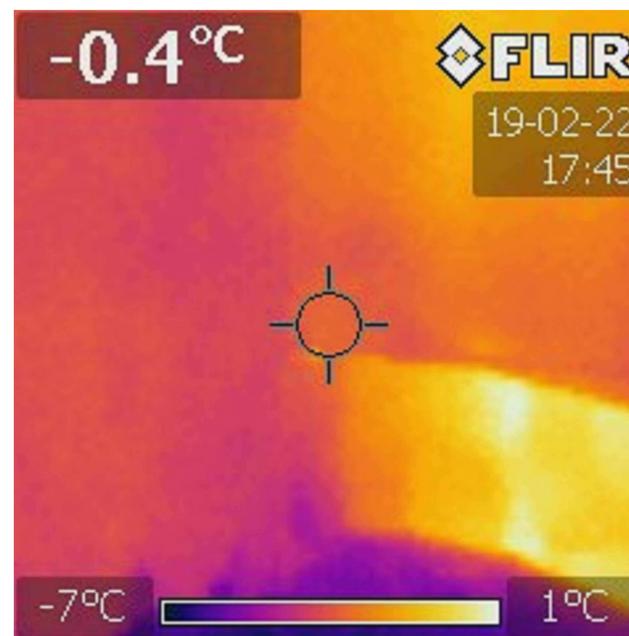


Вывод: Согласно полученным данным, наибольшие потери тепла обнаружены на стыке балконной плиты с кирпичной стеной (точка 6 на схеме). Также, согласно таблице 5 [2] нормируемый температурный перепад между температурой внутреннего воздуха и температурой внутренней поверхности ограждающей конструкции не должен превышать 4°C для жилых зданий. Для расчета были заданы граничные условия ( $t = 20^\circ\text{C}$  внутри помещения), из чего следует, что температурный перепад больше нормируемого. Отсюда можно сделать вывод, что во избежание выпадения конденсата на поверхности ограждающей конструкции нужно утеплить ограждающую конструкцию и узел примыкания стены к балконной плите.

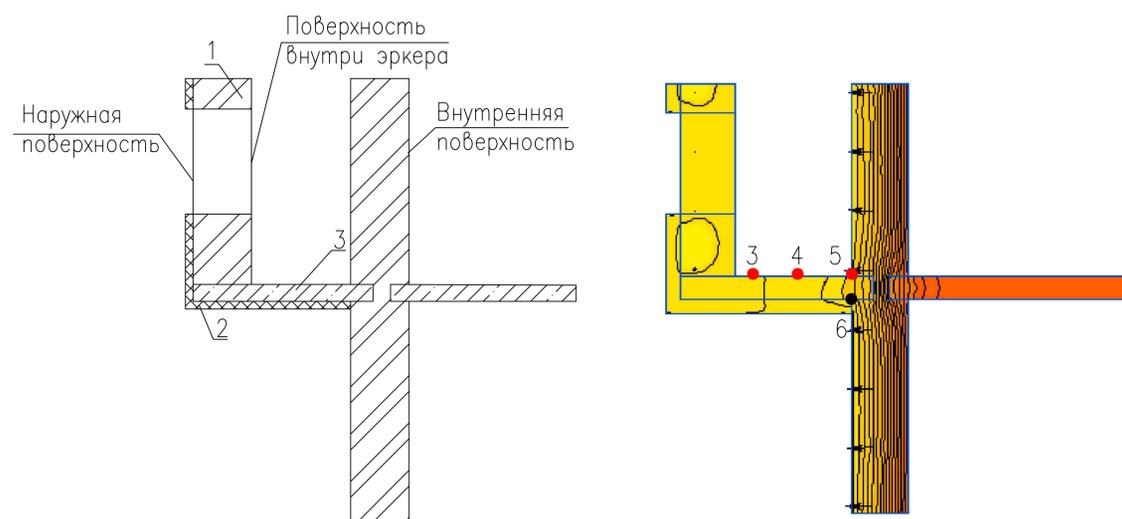
Тепловизионная съемка мостика холода



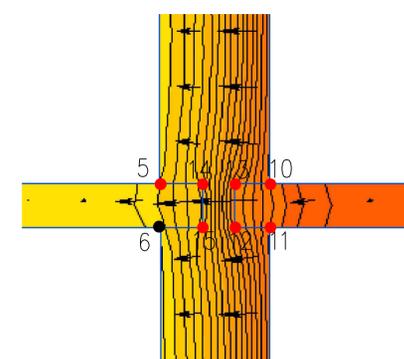
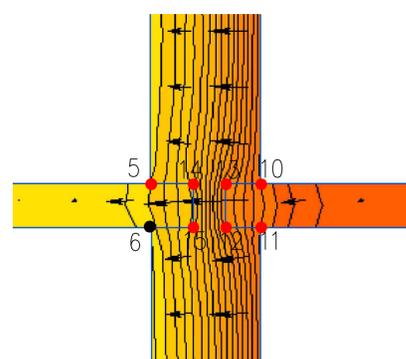
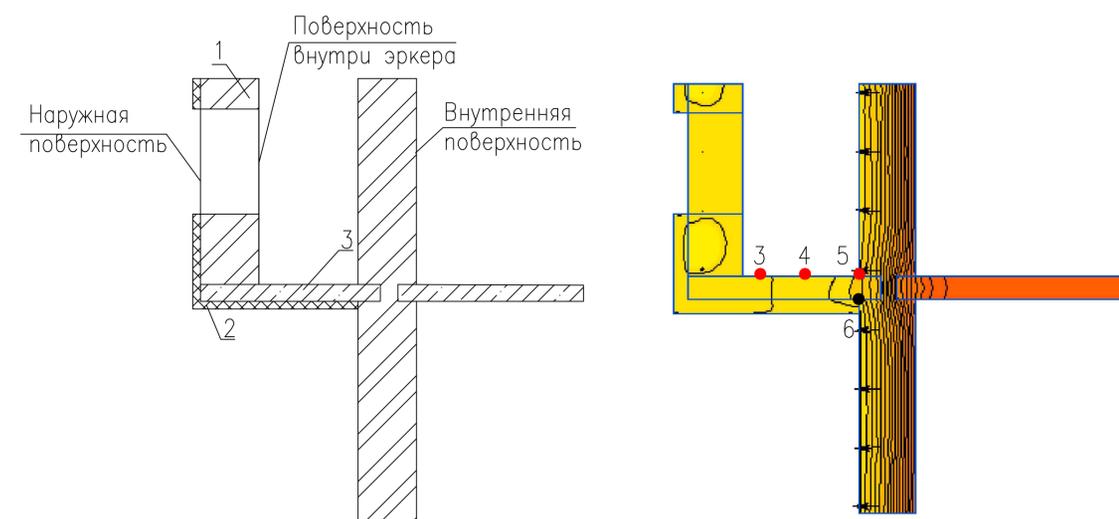
Тепловизионная съемка мостика холода



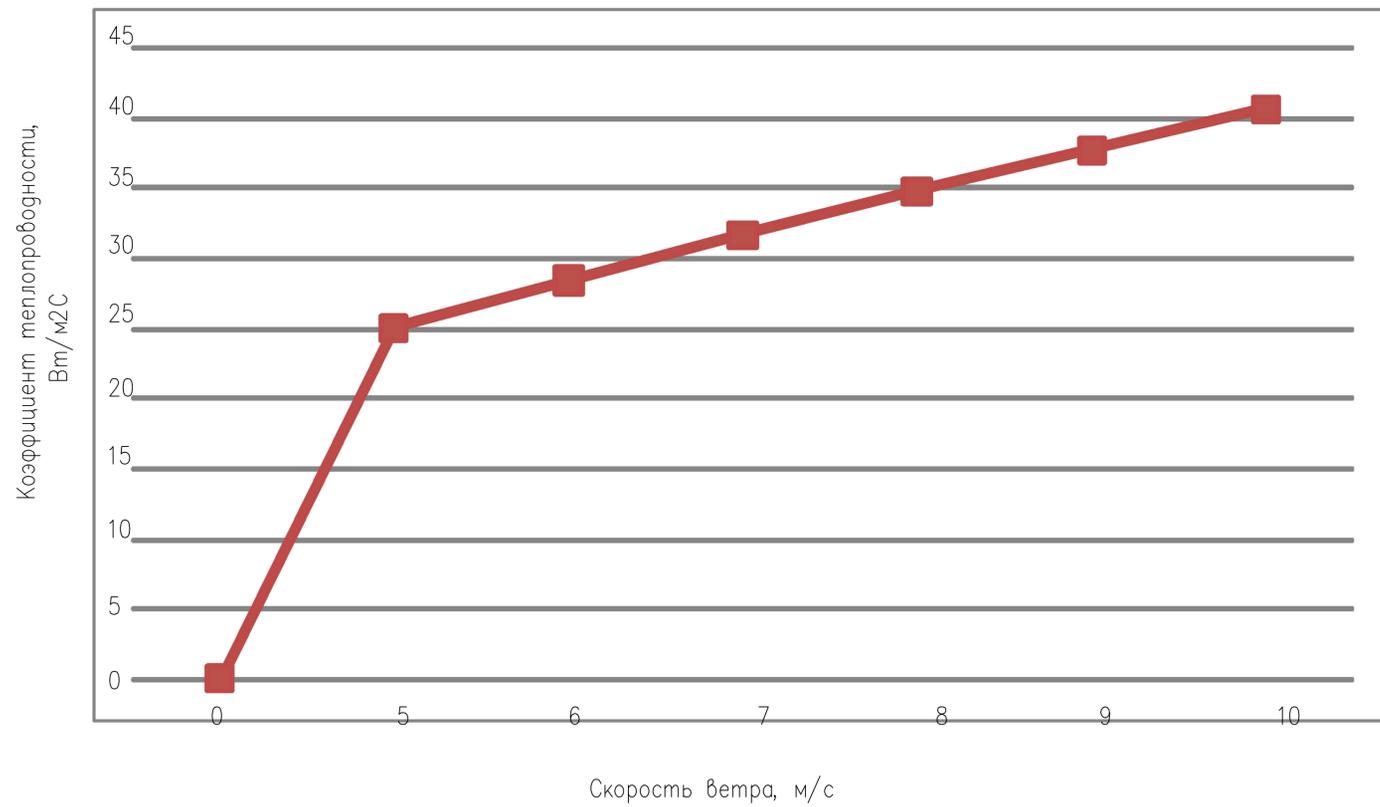
Термография по результатам проведенного исследования при стационарных условиях



Термография по результатам проведенного исследования при нестационарных условиях

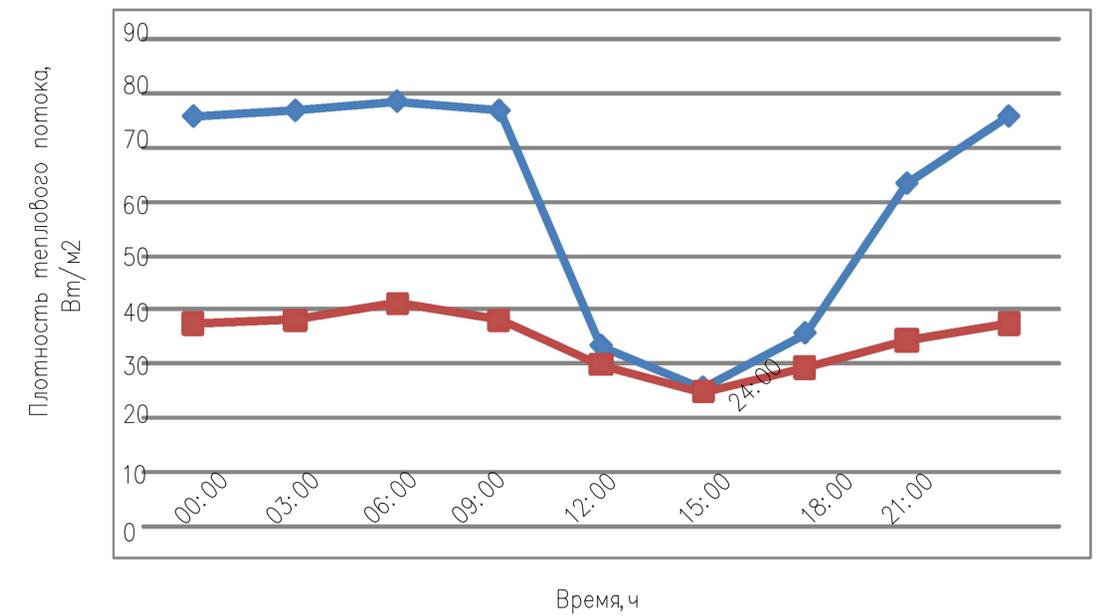
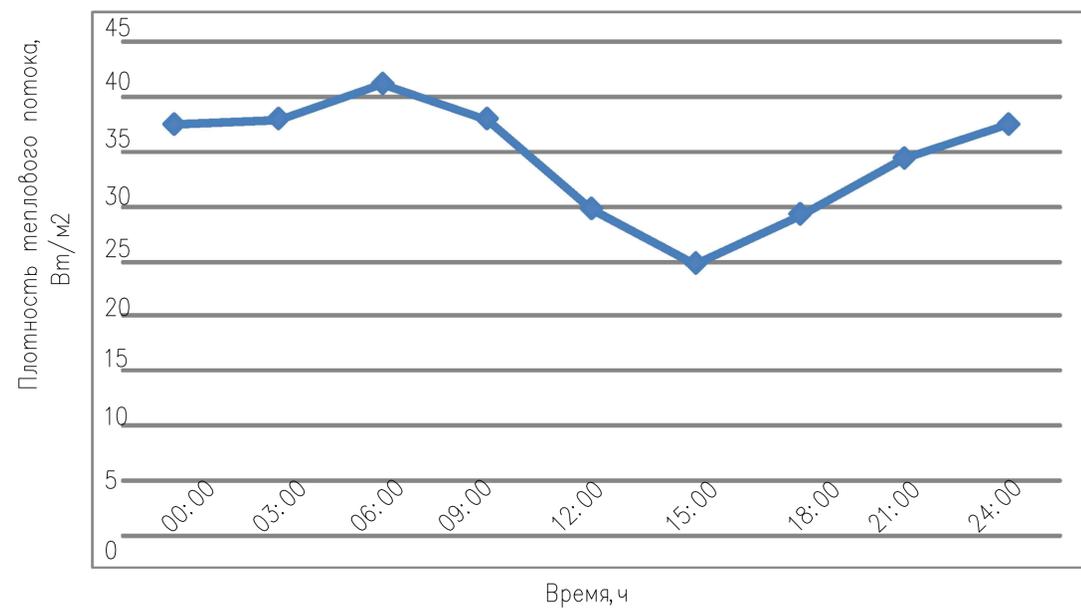


## Зависимость коэффициента теплоотдачи наружной поверхности кирпичной стены от скорости ветра



Сводный график суточного изменения плотности теплового потока ограждающей конструкции без утепления и утеплителем по наружному контуру

Суточные изменения плотности теплового потока на наружной поверхности стены с утеплением снаружи здания



## Заключение

В диссертационной работе проведен анализ эффективности теплозащиты существующих конструктивных решений и поиск факторов, влияющих на уровень теплозащиты выступающих архитектурных элементов и ограждающих конструкций при нестационарных условиях.

Проанализирована плотность теплового потока и распределения температур в толще ограждающей конструкции с утеплением при стационарных и нестационарных условиях в программном комплексе Elcut.

Практическая значимость заключается в том, что проанализированы методы оценки экономической эффективности возведения наружных стен гражданских зданий с учетом затрат на тепловую энергию, определена зависимость плотности теплового потока ограждающей конструкции от погодных условий; определена экономическая целесообразность применения теплоизоляционных материалов для ограждающих конструкций зданий при нестационарных условиях; рассчитаны затраты на отопление зданий с применением существующих теплоизоляционных материалов ограждающих конструкций при нестационарном режиме

В реальных условиях эксплуатации режим теплопередачи через ограждающие конструкции всегда оказывается нестационарным. Однако на практике в большинстве случаев рассматривается стационарный режим теплопередачи, характеризующийся постоянством во времени величины теплового потока и температуры ограждения.

Для прогнозирования теплопотерь через ограждающие конструкции была поставлена задача разработать научно-технические основы энергомимизации теплопотерь здания вследствие устранения геометрических и конструктивных мостиков холода ограждающих конструкций с учетом влияния природных факторов: солнечной радиации, скорости ветра, относительной влажности воздуха, осадков в Республике Хакасия.

При для этого были решены следующие задачи:

1. Проведение анализа эффективности теплозащиты существующих конструктивных решений и поиск факторов, влияющих на уровень теплозащиты выступающих архитектурных элементов и ограждающих конструкций при нестационарных условиях
2. Анализ конструктивных решений, минимизирующих теплопотери ограждающих конструкций
3. Анализ плотности теплового потока и распределения температур в толще ограждающей конструкции с утеплением при стационарных и нестационарных условиях в программном комплексе Elcut
4. Расчет экономической эффективности рассчитанных вариантов теплоизоляции конструктивных узлов ограждающих конструкций

Результатом работы была выявлена зависимость теплопотерь ограждающих конструкций при нестационарных условиях от природных факторов.

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Хакасский технический институт – филиал СФУ  
институт

Строительство  
кафедра

УТВЕРЖДАЮ

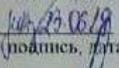
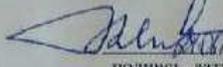
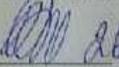
Заведующий кафедрой  
 Г.Н. Шибеева  
подпись                      инициалы, фамилия  
«26» 06 2019г.

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Анализ и регулирование теплопередачи ограждающих конструкций зданий  
при нестационарных условиях в программном комплексе Elcut  
тема

08.04.01 Строительство  
код и наименование направления

08.04.01.03 Теория и проектирование зданий и сооружений  
код и наименование магистерской программы

Научный руководитель	 подпись, дата	к.т.н., доцент	<u>Д.Г.Портнягин</u> инициалы, фамилия
Выпускник	 подпись, дата		<u>И.В.Герасимова</u> инициалы, фамилия
Рецензент	 подпись, дата	ген. директор	<u>В.В.Минюхин</u> инициалы, фамилия
Нормоконтролер	 подпись, дата	т.н., доцент	<u>Г.Н.Шибеева</u> инициалы, фамилия



Абакан 2019