ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

На правах рукописи

Чулков Александр Анатольевич

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗДАНИЙ, ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ В УСЛОВИЯХ ПЕРЕМЕННОГО ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА

Специальность 05.23.03 – «Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
к.т.н., доцент Ю.С.Вытчиков

Самара – 2020

Введение……. 4
Глава 1 Состояние исследований по изучению процессов теплопередачи в зданиях и сооружениях с прерывистым отоплением……...…… 11
1.1 Анализ научных работ по изучению процессов нестационарной теплопередачи в наружных ограждениях…..... 11
1.2 Анализ научных работ по изучению процессов нестационарной теплопередачи в отопительных приборах…… 22
1.3 Анализ научных работ по изучению процессов нестационарной теплопередачи в тепловой изоляции трубопроводов……..... 25
1.4 Выводы по главе 1……..……..... 29
Глава 2 Теоретическое и экспериментальное исследование процесса нестационарной теплопередачи через наружные ограждения в условиях прерывистого отопления…… 30
2.1 Исследование нестационарной теплопередачи в однослойных ограждениях в условиях прерывистого отопления…….. 30
2.1.1 Теоретическое исследование процесса нестационарной теплопередачи в однослойных наружных ограждениях ….. 31
2.1.2 Результаты исследования энергозатрат и времени нагрева однослойных наружных стен……... 37
2.2 Исследование нестационарной теплопередачи в многослойных ограждающих конструкций в условиях прерывистого отопления. 43
2.2.1 Определение энергозатрат и времени нагрева многослойных ограждающих конструкций приближенным аналитическим методом……. 44
2.2.2 Исследование влияния экранной тепловой изоляции на энергозатраты в периодах натопа зданий…… 45
2.2.3 Анализ целесообразности применения монолитного пенобетона для утепления наружных стен зданий, эксплуатируемых в условиях прерывистого отопления……. 49
2.2.4 Особенности теплотехнического расчета чердачных и цокольных перекрытий зданий при прерывистом отоплении……... 54
2.3 Экспериментальное исследование процесса нагрева стены..... 57
2.4 Особенности расчета темпа остывания помещений…… 60
2.5 Экспериментальные исследования теплозащитных характеристик ограждающих конструкций энергоэффективных зданий с применением беспесчаного керамзитобетона……. 62
2.6 Выводы по главе 2……... 64
Глава 3 Теоретическое и экспериментальное исследование процесса нестационарной теплопередачи в отопительных приборах…… 65
3.1 Тепловой баланс отапливаемого помещения……... 65

3.2 Математическое моделирование процесса нестационарной теплопередачи в отопительных приборах……. 66
3.3 Экспериментальное исследование процесса нагрева отопительных приборов…….. 71
3.4 Выводы по главе 3……... 78
Глава 4 Повышение эффективности тепловой изоляции трубопроводов системы теплоснабжения зданий……..... 79
4.1 Экспериментальное исследование коэффициента теплопроводности пенополиуретановых скорлуп……..……... 79
4.2 Результаты исследования коэффициента теплопроводности……. 81
4.3 Повышение теплозащитных характеристик пенополиуретановых скорлуп……. 83
4.4 Выводы по главе 4……... 90
Глава 5 Оптимизация выбора строительных ограждающих конструкций и технико-экономическое обоснование использования прерывистого отопления……. 91
5.1 Оптимизация конструктивных решений строительных ограждающих конструкций зданий, эксплуатируемых в условиях прерывистого отопления…… 91
5.2 Технико-экономическое обоснование применения прерывистого отопления……. 97
5.3 Выводы по главе 5……... 111
Заключение……..……... 112
Библиографический список……..……. 114
Приложения……. 126
Приложение А – Теплофизический расчет ограждающих конструкций…... 127
Приложение Б – Теплотехнический расчет фрагмента наружной стены….. 134
Приложение В – Протокол испытаний наружной стены в климатической камере……... 146
Приложение Г – Протоколы испытаний отопительных приборов…… 150
Приложение Д – Результаты расчета темпа остывания коттеджа……. 154
Приложение Е – Экспериментальные исследования блоков из беспесчаного керамзитобетона…….. 157
Приложение Ж – Акты и справки о внедрении…… 160

ВВЕДЕНИЕ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

В связи с реализацией в Российской Федерации федерального закона №261 от 23.11.2009 «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности» и роста цен на энергоносители в настоящее время уделяют большое внимание рациональному использованию тепловой энергии при эксплуатации зданий.

Основное снижение расхода тепла на отопление зданий осуществляется за счёт повышения теплозащитных свойств ограждающих конструкций.

В СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий» приведены современные нормативные требования по теплозащите, включающие выполнение санитарно-гигиенических и комфортных условий, а также условие энергосбережения. В указанном выше нормативном документе приведен перечень зданий и сооружений, на которые условие энергосбережения не распространяется.

К ним относятся жилые и общественные здания с периодическим отоплением – загородные коттеджи, бытовые здания, вахтовки и т.д.

Тепловой режим таких зданий является нестационарным в связи с периодичностью работы системы отопления и изменением температуры внутреннего воздуха в процессе их эксплуатации.

В связи с высоким спросом на строительство индивидуального жилья в пригородной и сельской местности вопросы энергоэффективности в таких зданиях в настоящее время весьма актуальны.

Удельная характеристика расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания является величиной, характеризующей класс энергоэффективности здания. Данную величину определяют на стадии проектирования расчетным путем исходя из архитектурных решений,

климатических условий района строительства, состава ограждающих конструкций, кратности воздухообмена, выбора системы отопления, применения высокоэффективных энергосберегающих технологий.

В связи с этим, при проектировании зданий индивидуальной жилой застройки необходимо учитывать все вышеуказанные факторы и тщательно подходить к выбору конструктивных решений, а также инженерных систем жизнеобеспечения. В жилых домах индивидуальной застройки основные затраты тепловой энергии расходуется на компенсацию тепловых потерь через ограждения. Для домов, эксплуатируемых в режиме дежурного отопления, наряду с показателем коэффициента теплопередачи через ограждения необходимо учитывать динамические показатели, характеризующие быстроту натопа помещений. Для возможности осуществления натопа помещений необходимо использовать быстронагреваемые малотемплоемкие отопительные приборы, реагирующие на изменение температуры теплоносителя за короткий промежуток времени.

Как правило, на загородных участках, помимо жилых домов имеются отапливаемые бани, гаражи и различные хозяйственные постройки (схематизация представлена на рисунке 1). При большом количестве отапливаемых строений целесообразно спроектировать отдельно стоящий источник тепловой энергии, позволяющий удовлетворить потребность в тепловой энергии, указанного выше комплекса строений. При такой схеме теплоснабжения необходимо от источника тепла до потребителей смонтировать тепловые трассы воздушным или подземным способами прокладки. Для уменьшения тепловых потерь от трубопроводов тепловых сетей необходимо выбирать высокоэффективную тепловую изоляцию трубопроводов, также позволяющую при аварийных ситуациях увеличить время остывания теплоносителя в трубах.

Грамотный выбор ограждающих конструкций, системы теплоснабжения, элементов системы отопления позволяет уменьшить

энергозатраты на обогрев зданий и в конечном итоге повысить энергетическую эффективность рассматриваемого жилого комплекса.

При проектировании зданий с прерывистым отоплением из-за переменного теплового режима необходимо учитывать динамические характеристики систем отопления и ограждающих конструкций.

В настоящее время отсутствует инженерная методика оценки энергоэффективности зданий, эксплуатируемых в условиях прерывистого отопления.

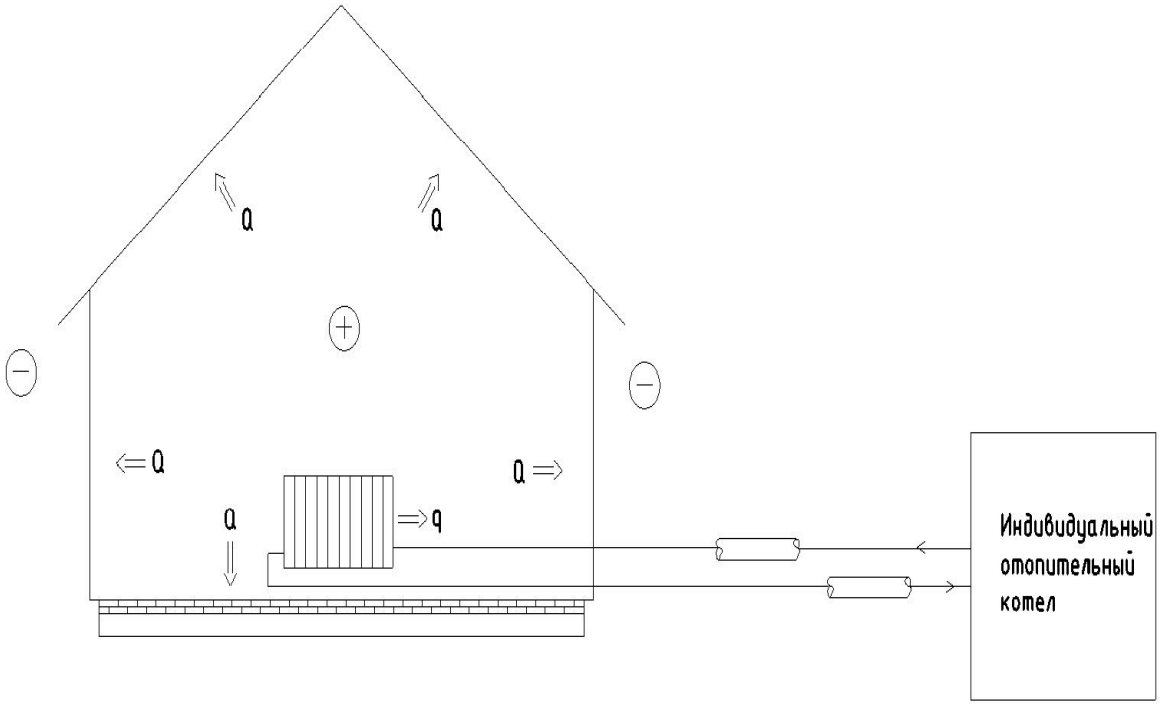


Рисунок 1. Схематизация системы теплоснабжения здания.

Степень разработанности темы исследования

Большой вклад в решение задач по повышению энергоэффективности зданий и сооружений внесли исследования российских и зарубежных ученых, опубликованные в монографиях и научных статьях, изучение которых позволило сформулировать задачи диссертационной работы.

Многие вопросы, касающиеся энергоэффективности зданий и сооружений, рассмотрены в работах российских ученых Б.А. Семенова, В.Н. Богословского, Е.Г. Малявиной, Д.Ю. Петрова, Е.Ю. Анисимовой, В.И. Панферова, Т.А. Дацюк, Ю.П. Ивлева, В.А. Пухкала, В.Г. Гагарина, Ю.А. Табунщикова, Ю.С. Вытчикова, А.Г. Кочева, Н.А. Цветкова, А.И. Еремкина, А.М. Берегового, А.М. Гримитлина, Т.В. Щукиной. Исследования этих ученых указывают на большие перспективы в области прерывистого отопления.

Однако в связи с недостаточной изученностью данной темы и отсутствия методик теплотехнического расчета ограждающих конструкций и элементов системы отопления в условиях переменного теплового режима необходимо дальнейшее исследование данной проблемы, что делает тему исследования актуальной.

Цель диссертационной работы заключается в разработке инженерных методов теплотехнического расчета ограждающих конструкций, отопительных приборов, тепловой изоляции трубопроводов для зданий и сооружений, эксплуатируемых в условиях переменного теплового режима.

Задачи исследования:

- математическое моделирование тепловых процессов в ограждающих конструкциях зданий и сооружений, эксплуатируемых в условиях переменного теплового режима;
- разработка инженерной методики расчета динамических характеристик отопительных приборов;
- разработка инженерной методики расчета динамических характеристик ограждений зданий;
- экспериментальные исследования динамических характеристик отопительных приборов;
- разработка высокоэффективной тепловой изоляции трубопроводов системы теплоснабжения;

- оптимизация конструктивных решений ограждающих конструкций зданий с прерывистым отоплением.

- технико-экономическое обоснование применения прерывистого отопления для зданий и сооружений.

Объектом исследования являются ограждающие конструкции, элементы системы отопления и теплоснабжения зданий индивидуальной застройки, эксплуатируемые в условиях прерывистого отопления.

Предметом исследования являются динамические характеристики ограждающих конструкций зданий и элементов систем отопления, теплозащитные характеристики наружных стен и энергозатраты на эксплуатацию зданий при прерывистом отоплении.

Научная новизна полученных результатов:

- получены аналитические зависимости для определения энергозатрат и времени нагрева многослойных ограждений, а также математическая зависимость для расчета максимально допустимого значения толщины теплоизоляционного материала наружного ограждения здания, работающего в условиях переменного теплового режима;

- разработана математическая модель и получены математические зависимости для определения энергозатрат и времени нагрева ограждающих конструкций с экранной теплоизоляцией, установлена аналитическая зависимость между энергозатратами и толщиной воздушной прослойки;

- на основе решения нестационарной задачи теплопередачи получена формула для нахождения времени нагрева отопительных приборов, а также проведена оценка времени нагрева радиаторов, выполненных из различных материалов, по результатам теоретического и экспериментального исследования;

- предложена новая защищенная патентом конструкция тепловой изоляции трубопроводов систем теплоснабжения на основе пенополиуретановых скорлуп.

Теоретическая и практическая ценность работы заключается в том, что на основе теоретического исследования предложена методика определения времени нагрева и энергозатрат многослойных ограждений зданий, эксплуатируемых в условиях переменной тепловой нагрузки. Разработаны конструкции стен, обладающие минимальными энергозатратами на их нагрев. Предложена методика оценки энергетической эффективности зданий, эксплуатируемых в условиях переменного теплового режима.

На основе анализа теоретических и экспериментальных исследований получены значения времени выхода различных отопительных приборов на стационарный режим работы. Для трубопроводов системы теплоснабжения зданий и сооружений разработана модель высокоэффективной тепловой изоляции, получен патент на полезную модель.

Методология и методы исследования: методы математической физики и теории тепломассообмена, экспериментальные и теоретические методы исследования инженерных систем и ограждающих конструкций.

Достоверность полученных результатов исследования обеспечена применением современных методов инженерных расчетов, а также поверенного лабораторного оборудования. Все исследования и расчеты выполнены согласно нормативной документации и государственных стандартов.

Экспериментальные исследования теплозащитных характеристик ограждающих конструкций и динамических характеристик отопительных приборов выполнены в аккредитованной лаборатории СамГТУ. В натурных условиях произведена оценка теплозащитных характеристик тепловой изоляции трубопроводов систем теплоснабжения.

Апробация результатов исследований. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на Третьем специализированном форуме «Девелопмент. Строительство. Ресурсосбережение» в рамках программы «Энергосбережение в строительстве и ЖКХ» (Тольятти, 2014 г.),

международной научной конференции «Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании», проходившей 16-17 ноября 2016 г. в МГСУ, город Москва, областном конкурсе Самарской области «Молодой ученый» в номинации Технические науки, Строительство за 2016-2017 г., на 10 – ой межрегиональной специализированной выставке «Малоэтажное и коттеджное строительство», проходившей 12-15 апреля 2018 г. в г. Самара, научно-техническом совещании «Применение искусственных пористых заполнителей и изделий на их основе в жилищном, гражданском, промышленном, дорожном и гидротехническом строительстве», проходившем 26-27 сентября 2018 г. на базе АО «НИИКерамзит» в г. Самара.

На защиту выносятся:

- аналитические зависимости, позволяющие определить время и энергозатраты на нагрев однослойных и многослойных ограждающих конструкций;
- результаты экспериментального исследования времени нагрева стены;
- результаты теоретических исследований влияния экранной тепловой изоляции на энергозатраты;
- результаты теоретических и экспериментальных исследований определения динамических характеристик отопительных приборов;
- запатентованная конструкция тепловой изоляции трубопроводов, позволяющая существенно снизить тепловые потери;
- аналитические зависимости для определения максимально допустимого значения толщины тепловой изоляции для однослойных и двухслойных ограждений.

Публикации. Основные положения диссертации отражены в 17 научных работах, из них 7 статей – в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК РФ, в том числе получен один патент РФ на полезную модель.

ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ИЗУЧЕНИЮ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В ЗДАНИЯХ И СООРУЖЕНИЯХ С ПРЕРЫВИСТЫМ ОТОПЛЕНИЕМ.

1.1 Анализ научных работ по изучению процессов нестационарной теплопередачи в наружных ограждениях.

Передача тепловой энергии через наружные ограждения является основным фактором, влияющим на состояние микроклимата в помещении. В нашей стране широко представлены инженерные методики расчета теплопередачи через ограждающие конструкции при стационарном процессе теплопередачи.

Большой вклад в изучении процессов стационарного теплопереноса через ограждающие конструкции внесли известные отечественные ученые: Фокин К.Ф., Богословский В.Н., Лыков А.В., Табунщиков Ю.А., Гагарин В.Г., Еремкин А.И., Береговой А.М., Вытчиков Ю.С., Цветков Н.А., Гримитлин А.М., Щукина Т.В. и другие. Для инженерных расчетов стационарных процессов получены несложные аналитические решения, позволяющие определять сопротивление теплопередаче, тепловой поток от внутреннего воздуха к наружной среде различных однородных и многослойных ограждений с учетом неоднородности и влажностного режима.

Из-за изменения температуры наружного и внутреннего воздуха, направления и скорости ветра, интенсивности солнечной радиации процесс теплопередачи в действительности является нестационарным.

В строительной теплофизике необходимость учета нестационарности появляется при решении таких задач, как определение амплитуды колебания внутреннего воздуха в помещениях при изменении теплоотдачи системой отопления во времени, расчета температурного поля в ограждении в связи с изменением температуры наружного воздуха и т.д.

Расчет процессов нестационарной теплопередачи при определенных допущениях сводится к решению одномерного дифференциального уравнения теплопроводности [4,5,43,51,80].

$$\frac{\partial t}{\partial z} = \frac{\lambda}{c\rho} \cdot \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}, \qquad (1.1)$$

где $\lambda, Вт/м\cdot^0 C$ – коэффициент теплопроводности материала; $c, Дж/кг\cdot^0 C$ – удельная теплоемкость материала; $\rho, кг/м^3$ – плотность материала.

Если перенос тепла происходит по всем трем направлениям, тогда уравнение имеет вид:

$$\frac{\partial t}{\partial z} = \frac{\lambda}{c\rho} \cdot \left[\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right]. \qquad (1.2)$$

Многие аспекты вопросов нестационарной теплопередачи в строительных ограждающих конструкциях освещены в работах Российских ученых: Богословского В.Н., Шкловера А.М., Семенова Б.А., Кононовича Ю.В. Малявиной Е.Г., Дацюк Т.А., Анисимовой Е.Ю., Петрова Д.Ю., Берегового А.М., Вытчикова Ю.С., Цветкова Н.А., Иванова В.В. [1÷5, 8, 10÷11, 29÷31, 38÷39, 48, 57÷59, 66, 82÷83, 88].

Богословским В.Н. был рассмотрен вопрос одностороннего нагрева и охлаждения ограждения [4].

При постоянной мощности системы отопления в помещении и температуре наружного воздуха в ограждении устанавливается стационарное поле распределения температур. Однако при скачкообразном изменении начальных условий на поверхности ограждения происходит перераспределение температуры от начального значения к соответствующему значению стационарной теплопередачи при новых условиях.

Богословским В.Н. получено численное решение указанной выше задачи. Изначально автор рассмотрел задачу о нахождении распределения

температур при одностороннем нагреве и охлаждении ограждения при изменении температуры внутренней поверхности. Результаты исследования представлены в виде графической зависимости относительной избыточной температуры θ_t от критерия Фурье F_0 и относительного расстояния $\frac{x}{l}$ от поверхности ограждающей конструкции (Рисунок 1.1.) и теплового потока θ_q от критерия F_0 (Рисунок 1.2.).

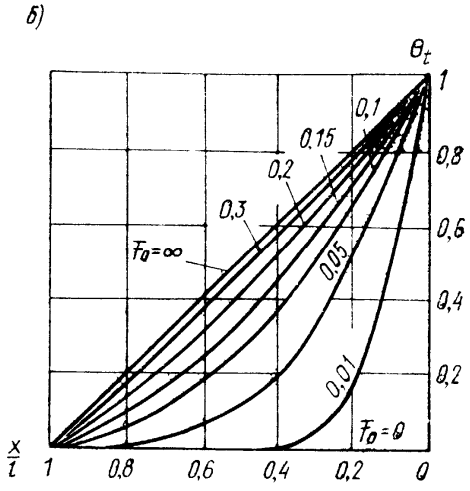


Рисунок 1.1.

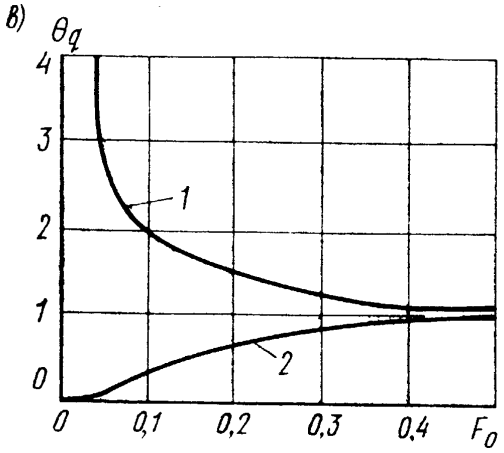


Рисунок 1.2.

Далее была рассмотрена задача одностороннего нагрева и охлаждения при изменении теплового потока на его поверхности. Результаты представлены в виде графической зависимости θ_t от F_0 и $\frac{x}{l}$ от поверхности ограждающей конструкции (Рисунок 1.3.) и зависимости θ_t от F_0 (Рисунок 1.4.).

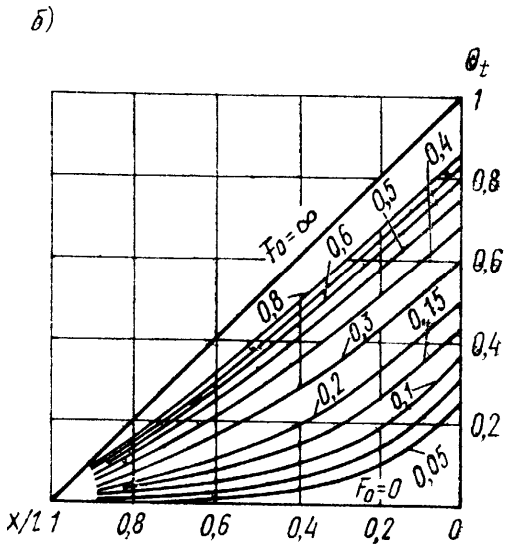


Рисунок 1.3.

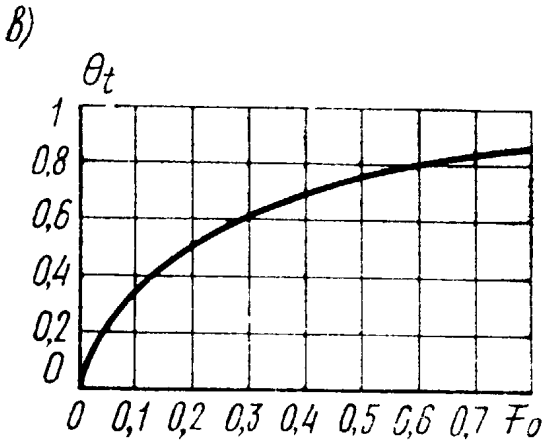


Рисунок 1.4.

Соколов Е.Я. в своей работе [73] предложил формулу для определения температуры внутреннего воздуха через время z после изменения теплового режима в помещении.

$$t_в(z) = t_н + \Delta t_н + \left[t_в^{'} - (t_н + \Delta t_н)\right] \cdot e^{-z/\beta}, \qquad (1.3)$$

где $\Delta t_н$ – температурная надбавка, эквивалентная величине внутренних тепловыделений и избытка теплоты при отоплении; $t_в^{'}$ – температура внутреннего воздуха к моменту нарушения нормального теплового режима; β – коэффициент аккумуляции тепловой энергии зданием.

В работе [48], выполненной Кононовичем Ю.В., рассмотрены математические модели процесса охлаждения и нагрева помещения.

Автор отмечает, что важно при проектирование наружных ограждающих конструкций учитывать возможность понижения внутренней температуры воздуха в течение до 5 суток и в последствии быстрого прогрева.

Далее Кононович Ю.В. рассматривает процессы теплопередачи в ограждениях при периодичной работе системы отопления. Им отмечено, что независимо от начальной температуры t_0 в толще стенки, через определенное количество времени $z^{'}$ после начала процесса нагрева или охлаждения

температура в толще ограждения распределяется по параболе с постоянными параметрами и становиться функцией времени. Данное квазистационарное распределение температуры описывается следующим уравнением:

$$t(x, z > z') = t_0 + B \cdot z' - \frac{B \cdot l^2}{2 \cdot a}\left[\left(1 - \frac{2}{Bi}\right) - \frac{x^2}{l^2}\right] , \qquad (1.4)$$

где Bi – критерий Био; l – размер стенки; B – скорость изменения температуры воздуха; x – расстояние от оси симметрии, отсчитываемое от середины стенки.

Шкловером А.М. был рассмотрен вопрос теплоустойчивости ограждающих конструкций при периодических колебаниях температуры наружного воздуха [88]. Наряду с этим автор рассматривает вопросы нестационарной теплопередачи при резком изменении теплового потока.

Анисимова Е.Ю. в работах [1÷3] рассматривает возможность экономии тепловой энергии при прерывистом отоплении зданий. Для возможности существенной экономии тепловой энергии автор на основе численного моделирования создал программное обеспечение, позволяющее определить оптимальный алгоритм управления микроклиматом здания в нерабочее время. В результате исследований доказано, что применение прерывистого отопления в нерабочее время позволяет сократить потребление тепловой энергии на отопление на 30-55 % при автономном источнике теплоты, а также неэффективности использования режима прерывистого отопления при подключении здания к центральным тепловым сетям в виду малого запаса по мощности.

Семеновым Б.А. рассмотрена задача [66] по определению количества тепла и времени нагрева однослойной наружной стены при отсутствии дежурного отопления. Начальная температура в помещении принималась равной температуре наружного воздуха.

Автором получено аналитическое решение для определения времени нагрева наружной стены в условиях внутренней и краевой задачи.

Семеновым Б.А. получена в виде графика (Рисунок 1.5) зависимость относительного теплого потока $\bar{q}_н$ от относительной средней температуры нагрева $\bar{\theta}_{ср.}$ для внешней и внутренней задач.

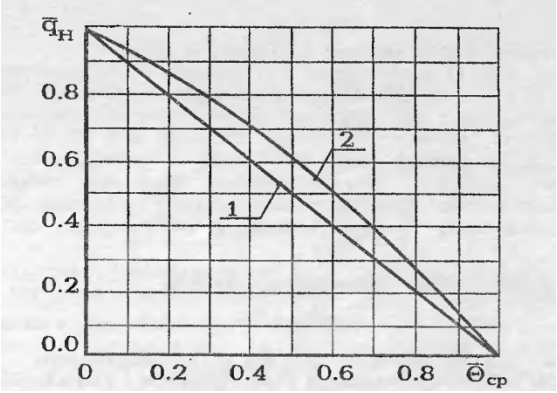


Рисунок 1.5. Кривая 1 – внешняя задача, Кривая 2 – внутреняя задача.

Изучение процессов изменения теплового режима помещений во времени вследствие отключения системы теплоснабжения представлено в работах [57÷59] Малявиной Е.Г.

В её работах представлены результаты ряда исследований, выполненных на ЭВМ, по времени натопа административных помещений.

Результаты расчетов представлены в графическом виде на рисунке 1.6.

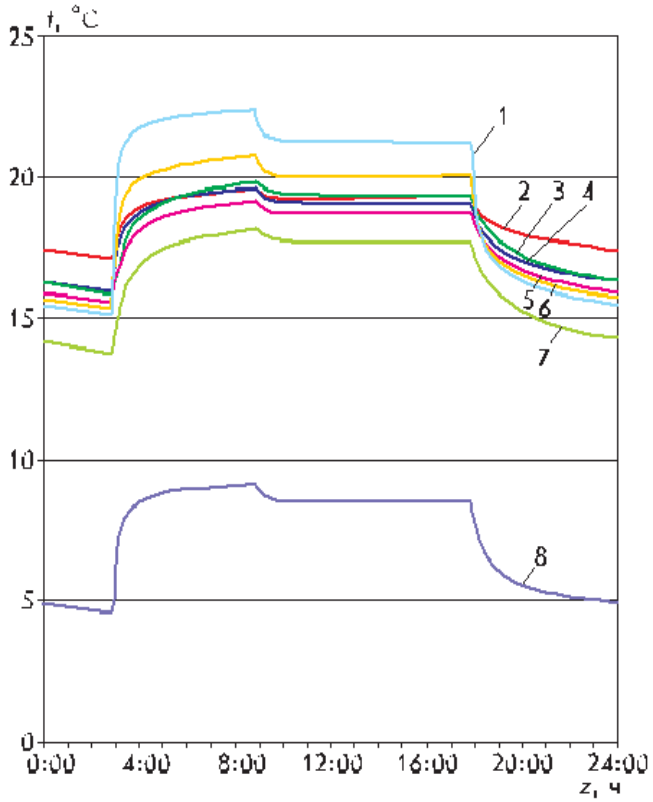


Рисунок 1.6. Изменения во времени температуры воздуха (1), на внутренней поверхности потолка (2), внутренней стены (3), пола (4), радиационной (5), результирующей (6), наружной стены (7) и окна (8) в течении суток при различных режимах эксплуатации здания.

В работах Дацюк Т.А. [30÷32] представлены результаты численного моделирования состояния микроклимата в помещениях с притоком наружного воздуха через вентиляционные распределители и отопительными приборами различной конфигурации при нестационарных процессах теплопередаче. Моделирование микроклимата выполнялось с помощью программного комплекса Star-CD на примере типовой жилой комнаты. При решении задачи теплообмен с соседними помещениями не учитывался.

Отопительные приборы конвектор и радиатор одной тепловой мощности установлены под окно. Над оконным блоком располагаются приточные клапана, обеспечивающие однократный воздухообмен в помещении. В результате проведенных исследований автор получил

следующие результаты: в режиме натопа помещения при работе конвектора температура в верхних точках (точки 1 и 3) устанавливается в три раза быстрее, чем при работе радиатора; в точках на уровне пола (точки 2 и 4) при работе конвектора температура воздуха возрастает быстрее на 40 %; при открытии приточных клапанов (происходит при температуре воздуха в верхних точках 28 °С) температура воздуха в исследуемых точках при работе радиатора уменьшается резче, чем при работе конвективного отопительного прибора.

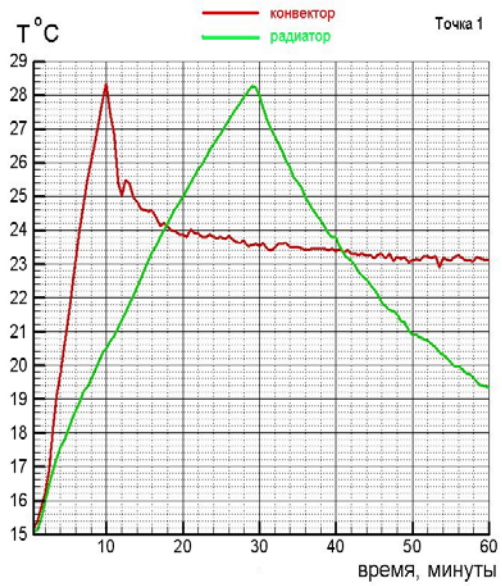


Рисунок 1.6.

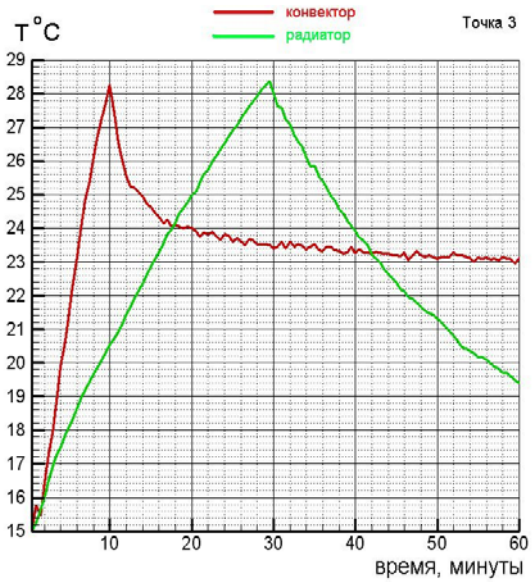


Рисунок 1.7.

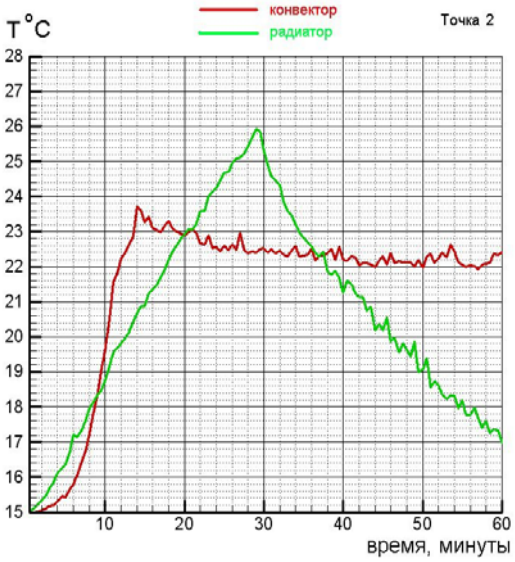


Рисунок 1.8.

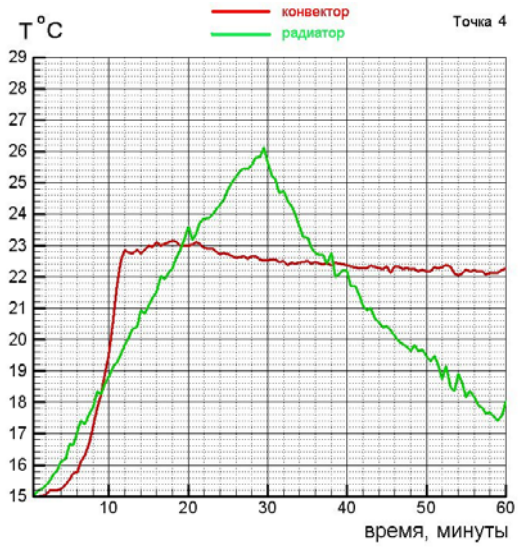


Рисунок 1.9.

На рисунках 1.6÷1.9 представлены результаты исследований температуры внутри помещения в контрольных точках в зависимости от вида отопительного прибора.

Цветков Н.А. [82] исследовал закономерности температурных режимов наружных деревянных стен из бруса в предельных случаях охлаждения.

Исследование проводилось при возможном варианте чрезвычайных ситуаций, при аварии отопительных систем, или нарушении целостности ограждающих конструкций здания. Здания при этом будут охлаждаться. В данной работе рассмотрены варианты охлаждения стен в двух случаях при прекращении теплоснабжения:

$V_{вент.}(\tau) \to \infty$; $V_{вент.}(\tau) \to 0$,

где $V_{вент.}(\tau)$ - кол-во инфильтрационного воздуха во времени.

В результате проведенных исследований получены формула, позволяющие определить время охлаждения деревянной стены от температуры наружного воздуха:

$$\tau_{охл.} = -10t_н^2 - 1100t_н + 66000, \text{ с при } V_{вент.}(\tau) \to \infty; \quad (1.5)$$

На рисунке 1.10 представлены результаты расчета охлаждения деревянной стены при $V_{вент.}(\tau) \to \infty$;

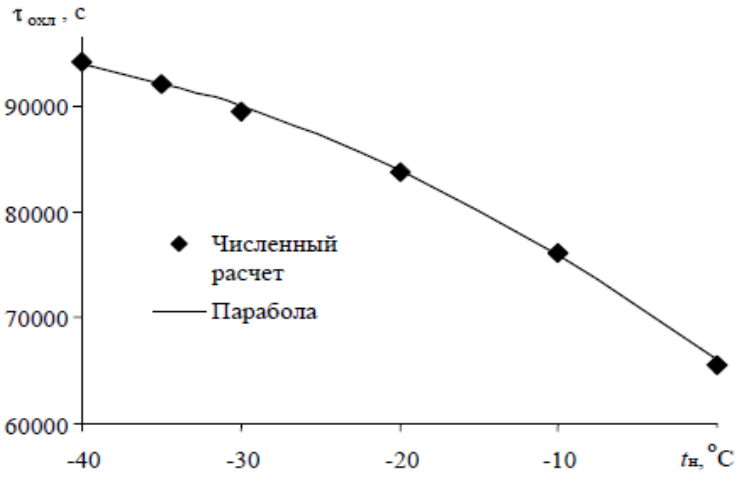


Рисунок 1.10. График охлаждения деревянной стены при $V_{вент.}(\tau) \to \infty$.

$$\tau_{охл.} = -36t_{н}^{2} - 4140t_{н} + 2692800, \text{ с при } V_{вент.}(\tau) \to 0. \quad (1.6)$$

На рисунке 1.11 представлены результаты расчета охлаждения деревянной стены при $V_{вент.}(\tau) \to 0$.

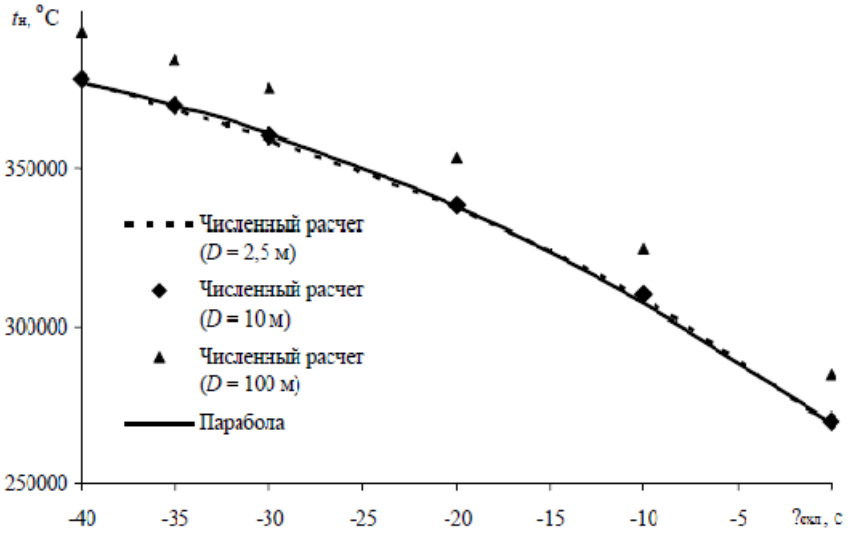


Рисунок 1.11. График охлаждения деревянной стены при $V_{вент.}(\tau) \to 0$.

Автор рекомендует для уменьшения времени охлаждения стены уменьшить инфильтрацию наружного воздуха.

Иванов В.В. в работе [38] рассматривает исследование процессов нагрева помещения после включения источника теплоты. Автор рассматривает динамику нагрева помещения с учетом внутренних и внешних потоков теплоты. Ученый подчеркивает, что решение уравнений теплопереноса зависит от чрезмерного количества чисел подобия. В связи с этим он рассматривает упрощенную модель помещения, состоящую из теплового источника и термически тонкой стенкой, а также распределение температуры воздуха в плане и по высоте принималось одинаковой. Для решения поставленной задачи были применены дифференциальные уравнения теплопереноса Лыкова А.В. в обобщенных переменных на основании критерий подобия. Для интегрирования уравнений был использован стандартный метод Рунге-Кутта, реализованный с помощью

программы на ЭВМ. В результате решения уравнений получены данные, реализованные в виде графиков изменения безразмерных температур ограждения θ_0 , температуры воздуха $\theta_в$, температуры источника тепла $\theta_и$ от времени.

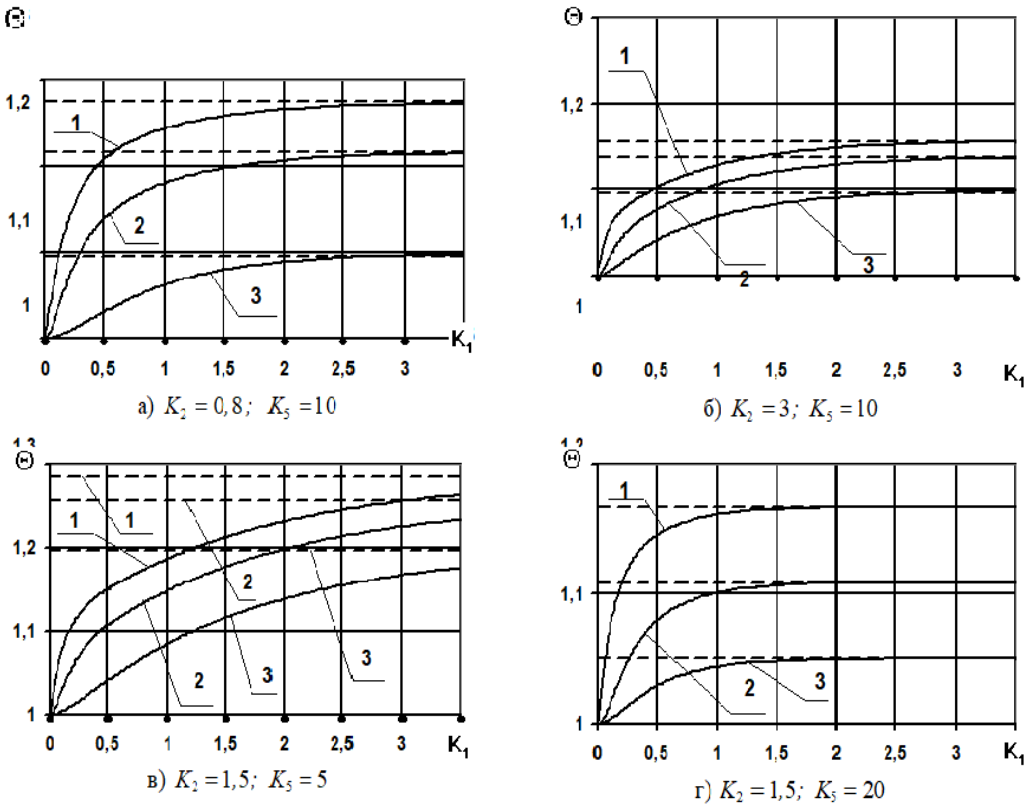


Рисунок 1.12. Динамика изменения θ_0 , $\theta_в$, $\theta_и$ от безразмерного времени К1 (произведение критерия Фурье и Померанцева) при критериях подобия К3=1, К4=0,5, К6=7, К7=0,1. 1 - $\theta_и$, 2 - $\theta_в$, 3 - θ_0 .

Проведя анализ работ по вопросам теплопередачи в строительных ограждающих конструкциях можно сделать вывод, что в настоящее время отсутствует доступная инженерная методика теплотехнического расчета многослойных строительных ограждающих конструкций в условиях прерывистого отопления. В связи с этим весьма актуальна тема связанная с расчетом многослойной ограждающей конструкции в условиях натопа

помещения с переходом от режима дежурного отопления к расчетному стационарному режиму.

1.2 Анализ научных работ по изучению процессов нестационарной теплопередачи в отопительных приборах.

Основной составляющей системы отопления являются отопительные приборы. В настоящее время на рынке представлено большое количество различных отопительных приборов. В процессе натопа помещения происходит изменение тепловой мощности отопительных приборов, в результате которого изменяется температура воздуха в помещении.

Методики теплотехнических расчетов отопительных приборов и их характеристики приведены в работах [6,50,74] Староверова И.Г., Богословского В.Н., Лапина В.М. и других авторов.

Согласно [6] по способу теплоотдачи отопительные приборы можно разделить на три группы:

- к первой относятся радиационные приборы, процесс передачи тепла в основном происходит за счет излучение (не менее 50% от общего теплового потока);

- ко второй относятся конвективно - радиационные приборы, процесс передачи тепла в которых происходит в основном за счет конвекции (от 50 до 75 % от общего теплового потока);

- к третьей группе относятся конвективные приборы, процесс передачи тепла в которых происходит за счет конвекции (не менее 75% от общего теплового потока).

Тепловая инерция отопительного прибора характеризуется временем его нагрева.

Согласно [74,79] по тепловой инертности отопительные приборы делятся на:

- на инерционные, $T_{пр} > 1{,}5ч$;

- средней инертности, $T_{пр} = 0{,}5 \div 1{,}5ч$;

- безинерционные, $T_{пр} < 0{,}5ч$.

Уравнение процесса нагрева отопительного прибора представлено в работе Туркина В.П. [79].

$$\Delta t_{пр} = \Delta t_{пр.уст.} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\tau}{T_{пр}}}\right), \qquad (1.7)$$

где $T_{пр}, ч$ – постоянная времени прибора; $\Delta t_{пр.}, {}^0C$ – температурный напор;

$\Delta t_{пр.уст.}, {}^0$С– установившийся температурный напор в конце переходного периода.

На рисунке 1.13 представлены графики процессов нагрева и охлаждения отопительного прибора.

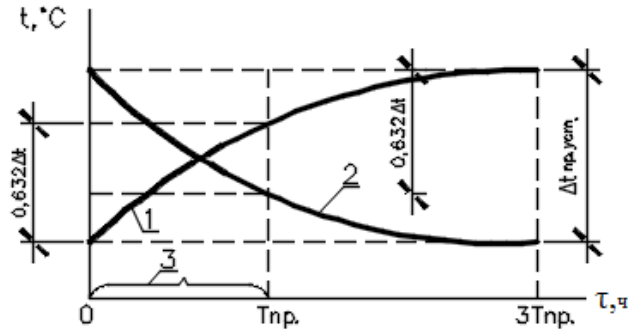


Рисунок 1.13. Процессы нагревания и охлаждения отопительного прибора.

1 - процесс нагрева; 2 - процесс остывания; 3 - постоянная времени прибора $T_{пр.}$.

На рисунке 1.14 представлен график реального процесса нагрева (1) и охлаждения (2) приборов в системе водяного отопления.

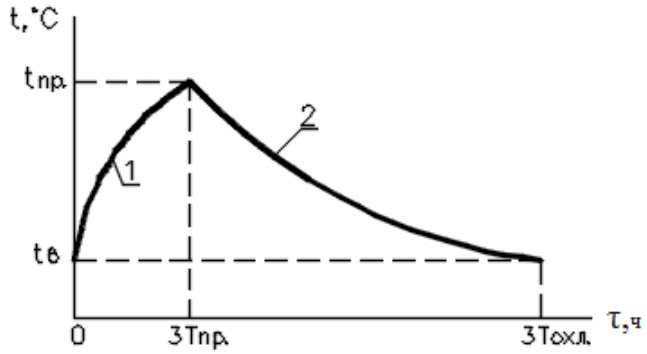


Рисунок 1.14. График реального процесса нагревания и охлаждения приборов в системе водяного отопления.

Пухкал В.А. [63] исследовал процесс инертности отопительных приборов марок: конвектор типа Atoll (ПКН 310) Изотерм» и панельный радиатор типа Profil-Kompakt (FKO 22-03-09) Kermi по выше указанной методике, предложенной Туркиным В.П.

Захаревич А.Э. в работе [5], выполненной под руководством профессора Дячека П.И., рассматривает вопросы экономии тепловой энергии при прерывистом отоплении в условиях применения различных видов отопительных приборов. Автор разработал нестационарную двумерную физико-математическую модель переноса тепла в ограждающих конструкциях с учетом сопряжения различных видов теплообмена в свободном пространстве отапливаемых помещений. Данный метод реализован в авторской программе на ЭВМ. По результатам численного моделирования выполнен расчет экономии тепловой энергии при прерывистом отоплении в условиях применения различных видов отопительных приборов. Расчеты показали, что наиболее эффективными приборами при периодической подаче тепловой энергии являются конвективные приборы, панельные отопительные приборы являются неэффективными, в виду их большой инертности.

Китаев Д.Н. в статье [49] исследовал различные отопительные приборы.

Исследование заключалось в уточнение эмпирического показателя n отопительных приборов, зависящего от типа прибора и схемы его подключения. Автор указывает, что в различных справочниках данный показатель принято брать усредненным n=0,25. Но в процессе исследования выяснилось, что подавляющее большинство современных отопительных приборов, представленных на рынке РФ, имеет данный показатель в диапазоне 0,27 и 0,3, но значение коэффициента n варьируется в пределах 0,12÷0,5. В связи с этим автор предлагает внимательно подходить к проектированию графиков тепловых сетей и применять при расчетах n=0,3, что позволит уменьшить величину ошибки в графиках регулирования тепловой нагрузки потребителя.

В настоящее время отсутствует аналитическая методика расчета времени прогрева отопительных приборов, подтвержденная экспериментальными данными. В связи с этим актуальной является задача по разработке методики расчета динамических характеристик отопительных приборов.

1.3 Анализ научных работ по изучению процессов теплопередачи в тепловой изоляции трубопроводов.

Важнейшая роль в комплексном подходе по снижению затрат тепловой энергии, отводится тепловой изоляции трубопроводов. По данным различных источников потеря тепла в трубопроводах систем теплоснабжения в России составляет до 20 % или 324 млн Гкал/год (59,5 млн т.у.т./год).

По приближенным оценкам высокоэффективная тепловая изоляция, позволяющая повысить теплозащитные свойства теплоизоляционных конструкций промышленных сооружений, оборудования и трубопроводов систем теплоснабжения и отопления, в состоянии в ближайшее время обеспечить экономию энергии в объеме 40 млн.т.у.т. [24]. Нормативные показатели сопротивления теплопередаче, использующиеся в РФ до 1995 года, превышали более чем в три раза нормативные значения, действующие в

Европе, США и Канаде. С принятием Федеральной программы энергосбережения в строительстве в РФ положение стало кардинально меняться. В результате ее реализации были повышены нормативные значения сопротивления теплопередаче строительных ограждающих конструкций до показателей, действующих в странах Западной Европы с близкими климатическими условиями и существенно снижены значения теплового потока через изолированные поверхности трубопроводов [69÷70].

Исследования тепломассообменных процессов и тепловых характеристик тепловой изоляции трубопроводов изложены в работах Хижнякова С.В., Скворцова А.А., Чернова А.В., Шишкова И.А., Энно, И.К., Кравченко Д.К., Половникова В.Ю. Кузнецова Г.В., Вытчикова Ю.С. и других [13,45÷47, 81].

В работе [81] Хижнякова С.В. подробно изложены методики расчета наиболее распространенных случаев тепловой изоляции трубопроводов.

Вопросы исследования физико-химических свойств, структуры и состава различных теплоизоляционных материалов широко представлены в работе Гурьева В.В. [24].

Исследование состояния тепловой изоляции трубопроводов при увлажнении и сушке представлены в работах Кравченко Д.К., Кузнецова Г.В., Половникова В.Ю. [45÷47]. В данных работах приводятся результаты экспериментального определения времени сушки тепловой изоляции трубопровода, эксплуатируемого в затопленном канале теплосети.

В работе [33] Дулькина А.Б. представлены результаты исследования времени замерзания воды в утепленном трубопроводе при отключении системы теплоснабжения.

Исследованием остывания теплоносителя при прерывистом отопление жилых зданий занимался Мишин М.А. [60]. Автор рассматривает возможность использования метода прерывистого отопления для жилых

зданий массовой застройки. Основной аспект уделяется процессам нагрева и остывания воздуха в помещениях и теплоносителя в трубопроводах.

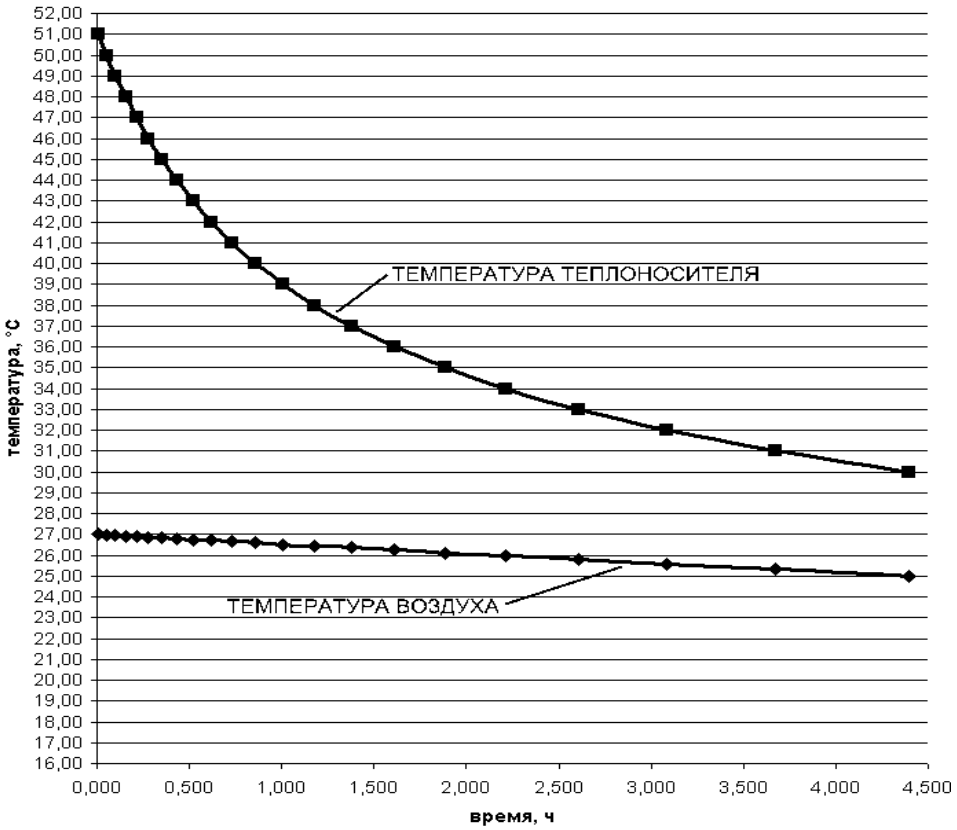


Рисунок 1.15. График остывания теплоносителя и внутреннего воздуха по результатам моделирования.

В результате исследований получен график (рисунок 1.15) остывания теплоносителя и внутреннего воздуха для жилого дома. Исходя из рисунка видно, что температура теплоносителя после прекращения циркуляции изменяется по экспоненте, когда температура воздуха изменяется практически по линейному закону.

Далее автор для оценки вышеописанной математической модели нестационарного остывания теплоносителя провел натурный эксперимент.

Результаты эксперимента представлены в виде рисунка 1.16.

Результаты экспериментальных данных схожи с результатом математического моделирования, что говорит о правильности выбора расчетной модели.

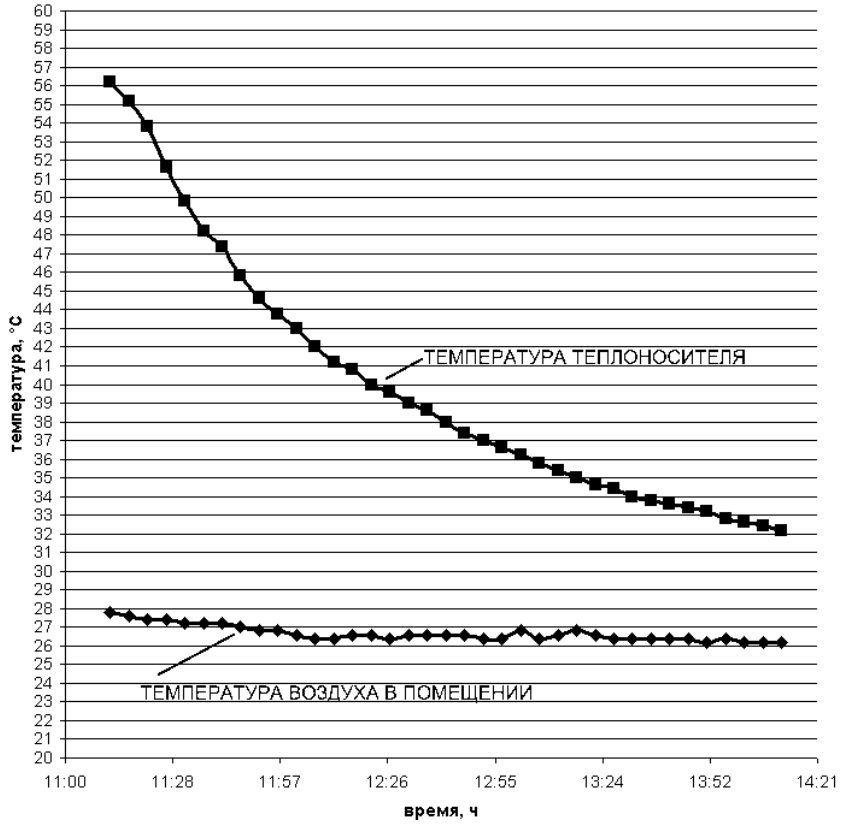


Рисунок 1.16. График остывания теплоносителя и внутреннего воздуха по результатам эксперимента.

В связи с реализацией программы энергосбережения, предусматривающей ужесточение требований к тепловой изоляции трубопроводов систем теплоснабжения, существенное изменения произошли в конструктивных решениях тепловой изоляции. Для изоляции трубопроводов в настоящее время широко используются современные теплоизоляционные материалы на базальтовой основе и пенопласты.

Наибольшее распространение среди пенопластов получили материалы с низким водопоглащением - экструзионные пенопласты и пенополиуретаны.

К преимуществам пенопластов по сравнению с волокнистыми материалами относятся: более низкий коэффициент теплопроводности, низкое водопоглащение.

К недостаткам следует отнести горючесть и ограничение температурного диапазона применения. В связи с этим весьма актуальной

задачей является расширение области их применения за счет использования скорлуп, защищенных экранной тепловой изоляцией.

1.4 Выводы по первой главе.

1.Применение прерывистого отопления в процессе эксплуатации зданий позволяет существенно сократить потребление тепловой энергии.

2.На натоп и остывание помещения существенно влияет количество инфильтрационного воздуха.

3.При проектировании зданий, эксплуатируемых в режиме переменной тепловой нагрузки, необходимо выбирать ограждающие конструкции, позволяющие осуществлять быстрый натоп и медленное остывание помещений.

4.В режиме дежурного отопления целесообразно применять отопительные приборы малой инертности.

5.В системах отопления и теплоснабжения необходимо использовать тепловую изоляцию трубопроводов, позволяющую увеличить время остывания теплоносителя.

Анализ отечественных и зарубежных научных исследований по теме диссертации позволил сформулировать следующие проблемы:

- отсутствует инженерная методика оценки энергетических затрат на нагрев ограждающих конструкций зданий, эксплуатируемых в условиях прерывистого отопления;

- отсутствует инженерная методика теплотехнического расчета ограждающих конструкций, позволяющая рассчитать время прогрева ограждений;

- отсутствует инженерная методика расчета времени выхода на стационарный режим работы отопительных приборов.

ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ЧЕРЕЗ НАРУЖНЫЕ ОГРАЖДЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ПРЕРЫВИСТОГО ОТОПЛЕНИЯ.

2.1 Исследование нестационарной теплопередачи в однослойных ограждениях в условиях прерывистого отопления.

В настоящее время в целях экономии тепловой энергии при эксплуатации зданий индивидуальной застройки с временным пребыванием людей широко используется прерывистое отопление.

Согласно СП 50.13330.2012 [69] к таким зданиям предъявляются лишь санитарно-гигиенические и комфортные условия.

Вопросы исследования теплового режима зданий, эксплуатируемых в условиях переменной тепловой нагрузки рассмотрены в работах [1÷4,7,10,11,22,23,30÷32,38 ,57÷59,82].

На рисунке 2.1. представлен график изменения температуры внутреннего воздуха в таких зданиях.

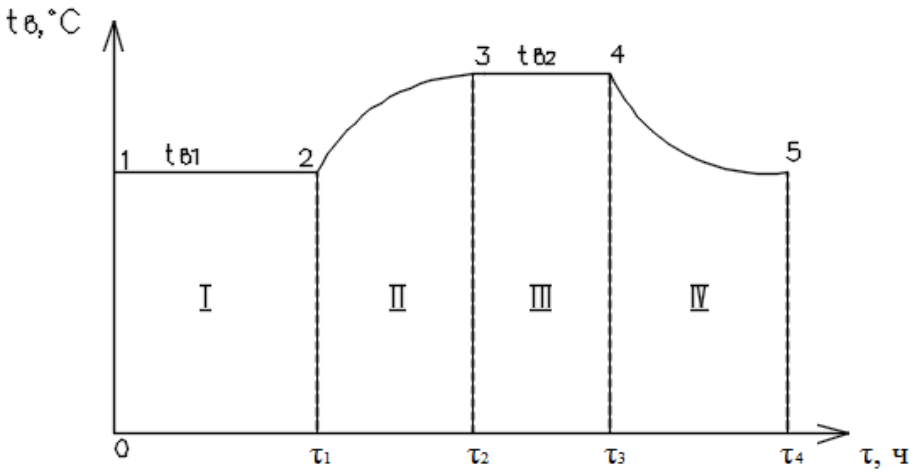


Рисунок 2.1. График изменения температуры внутреннего воздуха в зданиях, эксплуатируемых в режиме дежурного отопления.

Первый (I) период: $(0 \le \tau \le \tau_1)$ характеризуется работой системы дежурного отопления для предотвращения замораживания инженерных систем, а также выпадения конденсата на внутренних поверхностях ограждений здания.

Во втором (II) периоде: $(\tau_1 \le \tau \le \tau_2)$происходит натоп помещения при увеличении мощности системы отопления. Процесс характеризуется нестационарной теплопередачей через наружные ограждения.

Третий (III) период: $(\tau_2 \le \tau \le \tau_3)$ эксплуатация здания на расчетном стационарном режиме при температуре внутреннего воздуха $t_{в2}$.

Четвертый (Iv) период$(\tau_3 \le \tau \le \tau_4)$ характеризуется процессом остывания помещения. Температура внутреннего воздуха на этой стадии изменяется от $t_{в2}$ до первоначальной $t_{в1}$.

2.1.1 Теоретическое исследование процесса нестационарной теплопередачи в однослойных наружных ограждениях.

Рассмотрим решение одномерной задачи нестационарной теплопроводности для однослойного ограждения при следующих допущениях: значение критерия Био в пределах от 0,1 до 100, задача рассматривается в линейной постановке, коэффициент теплопроводности принимается постоянным, независящим от температуры материала. Со стороны внутренней поверхности стены задаются граничные условия 2-го рода в виде постоянного значения удельного теплового потока, поступающего от отопительных приборов. Со стороны наружной поверхности задаются граничные условия 3-го рода.

На рисунке 2.2. представлена схематизация процесса нестационарной теплопередаче для однослойной стенки.

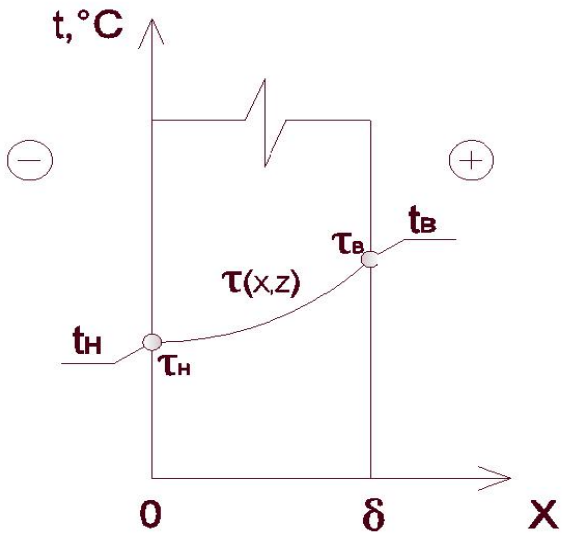


Рисунок 2.2. Схематизация процесса нестационарной теплопередаче для однослойной стенки.

При указанных выше допущениях математическая постановка рассматриваемой краевой задачи примет следующий вид:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a\frac{\partial^2 t}{\partial x^2};\ 0 \le x \le \delta \qquad (2.1)$$

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial x}\Big|_{x=\delta} = q_{от} \qquad (2.2)$$

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial x}\Big|_{x=0} = \alpha_н(\tau_н - t_н) \qquad (2.3)$$

$$t\big|_{\tau=0} = t_н \qquad (2.4)$$

где a - коэффициент температуропроводности, м²/с; δ - толщина наружной стены, м; $q_{от}$ - удельная мощность системы отопления, Вт/м²;

λ - коэффициент теплопроводности материала стены, Вт/(м· ℃);

$\alpha_н$ - коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности ограждающей конструкции, Вт/(м·ºС); $\tau_н$ - температура наружной поверхности ограждения, ºС; $t_н$ - температура наружного воздуха, ºС; $\tau_в$ - температура на внутренней поверхности ограждения, ºС; Z -время нагрева ограждения, ч;

$t_в$ - температура внутреннего воздуха, ºС.

Аналитическая зависимость для определения относительной температуры была получена в работе В.И. Ковалевского, Г.П. Бойкова [40].

Она имеет следующий вид:

$$\vartheta(X,Z) = 1 + K \cdot X + \frac{K}{B_i} - K\sum_{n=1}^{\infty} D_n \cos[\mu_n(1-X)]\exp(-\mu_n^2 \cdot F_o). \quad (2.5)$$

$\vartheta = \frac{\tau}{t_н}$; $\tau = f(X,Z)$; $X = \frac{x}{\delta}$;

$D_n = \frac{2(\mu_n^2 + Bi^2)}{\mu_n^2(\mu_n^2 + Bi^2 + Bi\ )}$ - безразмерный коэффициент;

μ_n - корень трансцендентного уравнения, $ctg\,\mu_n = \frac{\mu_n}{Bi}$;

$K = \frac{(t_в - t_н)\cdot\delta}{R_0 \cdot \lambda \cdot t_н}$ - безразмерный комплекс;

$F_o = \frac{a \cdot Z}{\delta^2}$ - критерий Фурье;

$Bi = \frac{\alpha_н \cdot \delta}{\lambda}$ - критерий Био.

Выражение для относительной температуры на внутренней поверхности наружной стены при X=1 в формуле (2.5) имеет вид:

$$\vartheta(1,Z) = 1 + K + \frac{K}{Bi} - K\sum_{n=1}^{\infty} D_n \exp(-\mu_n^2 \cdot Fo). \quad (2.6)$$

Введем понятие безразмерной температуры внутренней поверхности стены, значение которой определяется по следующей формуле:

$$\Theta_в = \frac{\tau_в - t_н}{\tau_{в\ \max} - t_н}, \quad (2.7)$$

где $\tau_в$ - температура внутренней поверхности наружной стены, ºС;

$\tau_{в\ \max}$ - максимальное значение температуры внутренней поверхности наружной стены, соответствующее стационарному тепловому режиму, ºС.

В результате математических преобразований получим выражение, связывающие величины $\vartheta(1, Z)$ и $\Theta_в$:

$$\Theta_в = \frac{t_н \cdot R_0 \cdot \alpha_в \cdot (\vartheta(1;Z)-1)}{(R_0 \cdot \alpha_в - 1)\cdot(t_в - t_н)} \quad (2.8)$$

Для нахождения средней относительной температуры стенки проинтегрируем выражение (2.5)

$$\vartheta_{ср} = \int_0^1 \vartheta(x)dX\,; \quad (2.9)$$

$$\vartheta(X,Z) = 1 + K\cdot X + \frac{K}{B_i} - K\cdot D_1 \cos[\mu_1(1-X)]\exp(-\mu_1^2\cdot F_0)\,; \quad (2.10)$$

$$\vartheta_{ср} = \int_0^1 \vartheta(X,Z)dX = \int_0^1 (1 + K\cdot X + \frac{K}{B_i} - K\cdot D_1 \cos[\mu_1(1-X)]\exp(-\mu_1^2\cdot F_0))dX\,; \quad (2.11)$$

$$\vartheta_{ср} = \int_0^1 \left(1+\frac{K}{B_i}\right)dX + K\int_0^1 XdX - K\cdot D_1\cdot \exp^{-\mu_1^2\cdot F_0}\int_0^1 \cos[\mu_1(1-X)]dX\,; \quad (2.12)$$

$$\vartheta_{ср} = \left(1+\frac{K}{B_i}\right)\cdot X\Big|_1^0 + \frac{K\cdot X^2}{2}\Big|_0^1 - K\cdot D_1\cdot e^{-\mu_1^2\cdot F_o}\cdot \frac{\sin[\mu_1\cdot(1-X)]}{\mu_1}\Big|_0^1\,; \quad (2.13)$$

$$\vartheta_{ср} = 1 + \frac{K}{Bi} + \frac{K}{2} - \frac{K}{\mu_1}\cdot D_1\cdot e^{-\mu_1^2\cdot F_o}\cdot \sin\mu_1\,. \quad (2.14)$$

Формула для определения средней температуры стенки имеет вид:

$$\tau_{ср} = \vartheta_{ср}\cdot t_н, \text{ºC}. \quad (2.15)$$

На рисунке 2.3 представлен результат расчета, выполненного по формулам (2.6) и (2.8) в виде зависимости $\Theta_в$ от F_0. Для выполнения расчета конструкция стены принималась в виде кладки из пустотелых керамзитобетонных камней на цементно – песчаном растворе.

Исходные данные для расчета представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1. Исходные данные для расчета.

δ, м	c, Дж/кг· ºС	ρ, кг/ м³	λ, Вт/(м·ºС)	$\alpha_в$, Вт/(м²·ºС)	$\alpha_н$, Вт/(м²·ºС)	$t_н$, ºС	$t_в$, ºС
0,39	840	800	0,24	8,7	23	-30	22

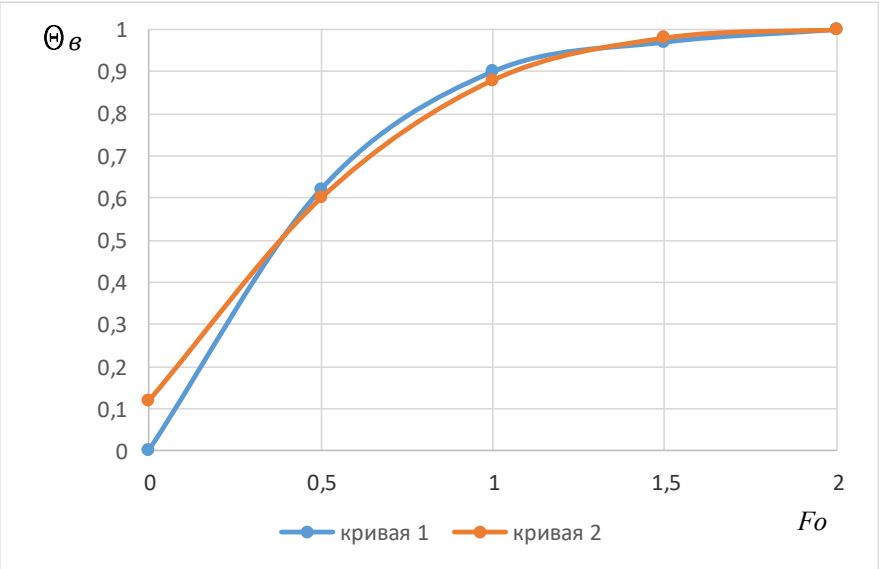


Рисунок 2.3. Зависимость безразмерной температуры внутренней поверхности наружной стены от критерия Фурье.

Кривая 1 - использование одного корня трансцендентного уравнения μ_1; кривая 2 - использование шести членов ряда.

Из рисунка 2.3 видно, что для выполнения инженерных расчетов достаточно использовать лишь один член ряда.

Получим выражение для определения времени нагрева однослойного ограждения, принимая в формуле (2.6) X=1, вида:

$$Z_н = -\frac{\delta^2}{\mu_1^2 \cdot a} \ln \frac{1 + K + \frac{K}{Bi} - 1 - \frac{(R_0 \cdot a_в - 1) \cdot (t_в - t_н)}{t_н \cdot R_0 \cdot a_в} \cdot \Theta_в}{K \cdot D_1}, c, \qquad (2.16)$$

где $a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}$ - коэффициент температуропроводности, м²/с.

Для нахождения времени нагрева наружной стены принимаем значение безразмерной температуры на внутренней поверхности $\Theta_в$=0,95.

Далее приведен алгоритм расчета времени нагрева и удельных затрат тепловой энергии на нагрев ограждений в условиях прерывистого отопления приближенным аналитическим методом.

Формула для определения времени нагрева согласно [66] имеет вид:

$$Z_н = 2\frac{Q_н}{q_{от}}\frac{1+2\varphi}{1+\varphi}, \text{ с}, \qquad (2.17)$$

где $Q_н$ - количество тепла, затрачиваемое на нагрев квадратного метра ограждающей конструкции, Дж/м^2;

На основе анализа работ [30÷32] следует, что температура внутреннего воздуха в помещение в процессе натопа достигает нормативных значений в течение одного часа, когда как стенка прогревается намного дольше. В связи с этим, для упрощения решения задачи целесообразно принять тепловой поток постоянным равным:

$q_{от} = \frac{t_{в2} - t_н}{R_0}$, Вт/м^2;

φ - безразмерный критерий граничных условий $\phi = \frac{R_н}{R_н + R}$;

$R_н = \frac{1}{\alpha_н}$ - термическое сопротивление процесса теплоотдачи, (м^2·ºС)/Вт;

$R = \frac{\delta}{\lambda}$ - термическое сопротивление однослойной ограждающей конструкции, (м^2·ºС)/Вт.

Удельные затраты тепловой энергии на нагрев однослойных наружных ограждений при наличии дежурного отопления определялись по формуле:

$$Q_н = c \cdot \rho \cdot \delta \cdot \Delta\tau \text{ , Дж/м}^2, \qquad (2.18)$$

где c - удельная теплоемкость материала конструкции, Дж/кг·ºС;

ρ - плотность конструкции, кг/м^3; δ - толщина конструкции, м.

Изменение температуры слоя однослойной ограждающей конструкции, наружная поверхность которой соприкасается с наружным воздухом, находилось по формуле:

$$\Delta\tau = 0,5(t_{в2} - t_{в1}) - \frac{t_{в2} - t_{в1}}{2R_0^{усл.}}\left(\frac{1}{\alpha_в} - \frac{1}{\alpha_н}\right), \text{ ºС}, \qquad (2.19)$$

где $t_{в1}$, $t_{в2}$ - температуры внутреннего воздуха при работе дежурного отопления и на расчетном режиме соответственно, ºС; $R_0^{усл.}$ - сопротивление теплопередаче однослойной ограждающей конструкции, (м^2·ºС)/Вт;

$\alpha_в$ – коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающей конструкции, Вт/(м^2·ºС); $\alpha_н$ – коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности ограждающей конструкции, Вт/(м^2·ºС).

$$R_0^{усл.} = \frac{1}{\alpha_в} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_н}, (м^2 \cdot ºС)/Вт. \qquad (2.20)$$

2.1.2 Результаты исследования энергозатрат и времени нагрева однослойных наружных стен.

В качестве примера по приведенным выше методикам был выполнен расчет для однослойного ограждения, выполненного в виде кладки из керамзитобетонных блоков на цементно – песчаном растворе, при этом использованы следующие исходные данные: δ=0,39 м; c=880 Дж/кг·ºС; ρ=900 кг/м^3; λ=0,29 Вт/(м·ºС); $\alpha_в$=8,7 Вт/(м^2·ºС); $\alpha_н$=23 Вт/(м^2·ºС); $t_н$=-30 ºС; $t_в$=22 ºС.

Расчет выполнялся в следующей последовательности:

1. Определялось сопротивление теплопередаче глади ограждающей конструкции по формуле (2.20)

$$R_0^{усл} = \frac{1}{8,7} + \frac{0,39}{0,29} + \frac{1}{23} = 1,5 \ (м^2 \cdot ºС)/Вт;$$

2. Находилось значение удельной мощности системы отопления

$$q_{от} = \frac{22 - (-30)}{1,5} = 34,6 \ Вт/м^2;$$

3. Определялось значение безразмерного критерия:

$$K = \frac{(20 - (-30)) \cdot 0.39}{1.5 \cdot 0,29 \cdot (-30)} = -1,55;$$

4. Значение критерия Био:

$$Bi = \frac{23 \cdot 0{,}39}{0{,}29} = 30{,}93;$$

5. Определялось значение корня трансцендентного уравнения при числе $Bi = 30{,}93$ согласно [59], $\mu_1 = 1{,}5$;

6. Вычислялось значение безразмерного коэффициента:

$$D_1 = \frac{2 \cdot \left(1{,}5^2 + 30{,}93^2\right)}{1{,}5^2 \cdot \left(1{,}5^2 + 30{,}93^2 + 30{,}93\right)} = 0{,}86;$$

7. Время нагрева наружной стены находилось по формуле (2.16):

$$Z_н = \left[\frac{0{,}39}{1{,}5^2 \cdot \frac{0{,}29}{880 \cdot 900}} \ln \frac{1 + (-1{,}55) + \frac{(-1{,}55)}{30{,}93} - \left(1 - \frac{(1{,}5 \cdot 8{,}7 - 1) \cdot (22 - (-30))}{(-30) \cdot 1{,}5 \cdot 8{,}7}\right) \cdot 0{,}95}{(-1{,}55) \cdot 0{,}86} \right] \div 3600 = 137{,}77ч;$$

8. Определялось изменение температуры однослойной наружной стены по формуле (2.19):

$$\Delta\tau = 0{,}5 \cdot (22 - (-30)) - \frac{(22 - (-30))}{2 \cdot 1{,}5} \cdot \left(\frac{1}{8{,}7} - \frac{1}{23}\right) = 24{,}74^0 C$$

9. Вычислялись энергозатраты на нагрев ограждения по формуле (2.18)

$$Q_н = \frac{880 \cdot 900 \cdot 0{,}39 \cdot 24{,}74}{1000} = 7294{,}4 \text{ кДж/м}^2;$$

10. Выполнялся расчет времени нагрева по формуле (2.17) предварительно рассчитав безразмерный критерий граничных условий

$$\varphi = \frac{\frac{1}{23}}{\frac{1}{23} + \frac{0{,}39}{0{,}29}} = 0{,}031;$$

$$Z_н = \frac{\left[\left(2 \cdot \frac{7294,4}{34,6 \cdot 1000}\right) \cdot \left(\frac{1+2 \cdot 0,031}{1+0,031}\right)\right]}{3600} = 120,71 ч;$$

11. Находилась погрешность определения времени нагрева однослойной наружной стены, полученная в результате использования приближенного аналитического метода.

$$\overline{\Delta X} = \frac{X_1 - X_2}{X_1} = \frac{137,77 - 120,71}{137,77} \cdot 100 = 12,38\,\%.$$

12. Определялась средняя относительная температура ограждения по формуле (2.14):

$$\vartheta_{ср} = 1 + \frac{-1,55}{30,93} + \frac{-1,55}{2} - \frac{-1,55}{1,5} \cdot 0,86 \cdot 2,72^{-1,5^2 \cdot 1,76} \cdot \sin 1,5 = 0,158$$

13. Вычислялось значение средней температуры ограждения по формуле (2.15):

$$\tau_{ср} = -0,158 \cdot 30 = -4,74\text{, }^{\circ}\text{C}.$$

14. Вычислялись энергозатраты на нагрев ограждения по формуле:

$$Q_н = c \cdot \rho \cdot \delta \cdot \left(\tau_{ср} - t_н\right) = 0,88 \cdot 900 \cdot 0,39 \cdot \left(-4,74 + 30\right) = 7802,3 \text{ кДж/м}^2$$

15. Находилась погрешность определения энергозатрат на нагрев ограждения:

$$\overline{\Delta X} = \frac{X_1 - X_2}{X_1} = \frac{7802,3 - 7294,4}{7294,4} \cdot 100 = 7\,\%.$$

16. Определялась относительная температура ограждения при $F_o \to \infty, X = 1$:

$$\vartheta(1, \infty) = -0,601.$$

17. Вычислялась температура на внутренней поверхности стенки по завершению процесса натопа:

$$\tau(X = 1) = \vartheta(1, \infty) \cdot t_н = -0,601 \cdot (-30) = 18,03 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Исходя из выполненных расчетов видно, что время и энергозатраты на нагрев рассчитанные по разным формулам схожи, данные разнятся в пределах погрешности. Температура на внутренней поверхности ограждения соответствует стационарному режиму работы.

Для вышеуказанного примера представлен расчет зависимости безразмерной температуры $\Theta_в$ от координаты X при различных значениях критерия Фурье F_o в графическом виде (рисунок 2.4).

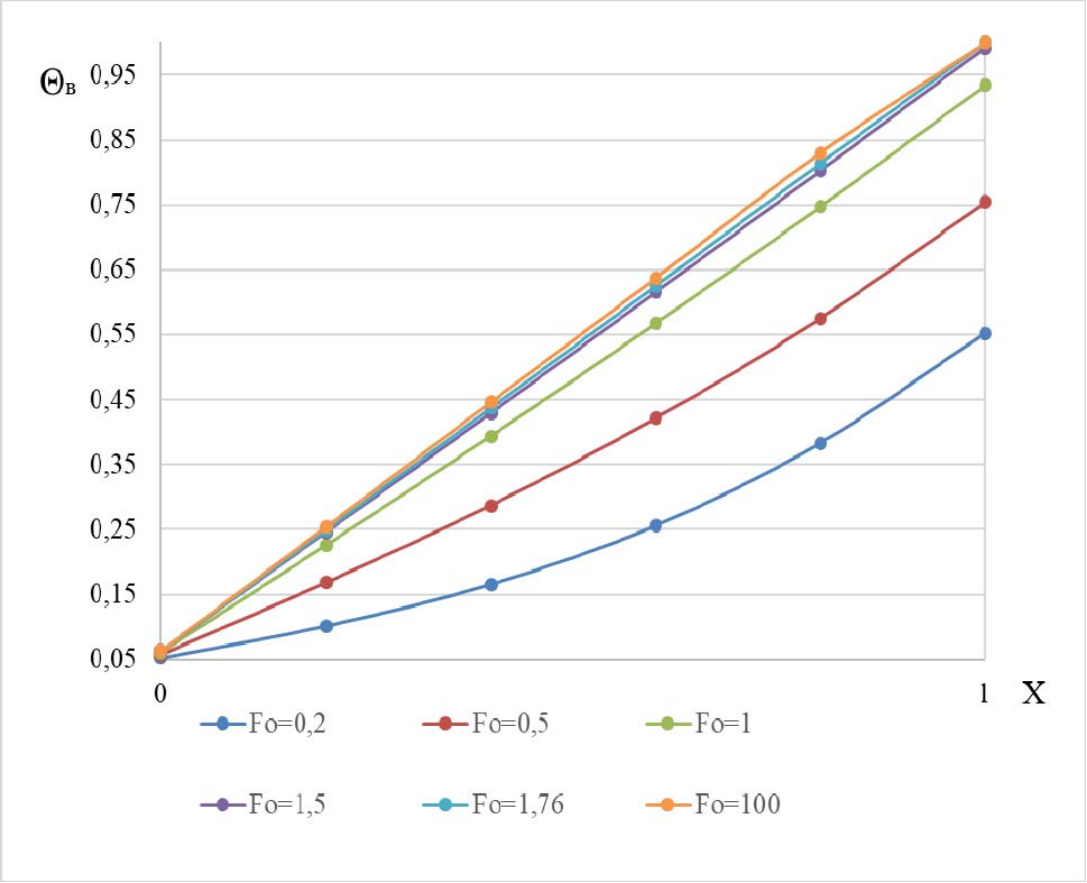


Рисунок 2.4. Зависимость безразмерной температуры $\Theta_в$ от координаты X при различных значениях критерия Фурье F_o.

В таблице 2.2 представлены результаты расчетов однослойных наружных стен при отсутствии дежурного отопления.

Таблица 2.2. Результаты расчетов однослойных наружных стен при отсутствии дежурного отопления.

№	Конструкция наружной стены	Сопротивление теплопередаче , ($м^2 \cdot ^oC$)/Вт	Удельные энергозатраты , **кДж/м²**	Время нагрева наружной стены, ч		Относит.погрешность, %
				Точное решение	Приб. аналит.	
1	Кладка из керамзитобетонных блоков на цементно-песчанном растворе толщиной 0,4 м	1,50	7294,40	137,77	120,71	12,4
2	Кладка из керамического кирпича на цементно-песчанном растворе толщиной 0,64 м, плотностью 1800 кг/м3	1,07	24568,02	324,56	293,79	9,5
3	Кладка из газобетонных блоков на клеевом растворе толщиной 0,4 м и плотностью 600кг/м3	2,66	5097,98	164,75	147,23	10,6
4	Наружная стена из соснового бруса толщиной 0,3 м и плотностью 500 кг/м3.	2,30	8686,09	241,17	217,72	9,7
5	Кладка из керамзитобетонных камней из беспесчаного керамзитобетона на теплом растворе толщиной 0,4 м, плотностью 600 $кг/м^3$	2,94	4984,12	179,21	159,15	11,2

Из данных, представленных в таблице 2.2, следует, что погрешность приближенного аналитического метода находится в пределах 12,4%.

В таблице 2.3 представлены результаты расчетов однослойных наружных стен при наличии дежурного отопления.

Таблица 2.3. Результаты расчетов однослойных наружных стен при наличии дежурного отопления.

№	Конструкция наружной стены	Сопротивление теплопередаче , $(м^2 \cdot ^oC)/Вт$	Удельные энергозатраты , $кДж/м^2$	Время нагрева наружной стены , ч
1	Кладка из силикатного кирпича на цементно-песчанном растворе толщиной 0,64 м	1,00	4670,55	52,26
2	Кладка из керамзитобетонных блоков на цементно-песчанном растворе толщиной 0,4 м	1,50	1397,11	23,12
3	Кладка из керамического кирпича на цементно-песчанном растворе толщиной 0,64 м, плотностью 1800 кг/м3	1,07	4697,35	56,17
4	Кладка из газобетонных блоков на клеевом растворе толщиной 0,4 м и плотностью 600кг/м3	2,66	978,19	28,25
5	Наружная стена из соснового бруса толщиной 0,3 м и плотностью 500 кг/м3.	2,30	1666,07	41,76
6	Кладка из керамзитобетонных камней из беспесчаного керамзитобетона на теплом растворе толщиной 0,4 м, плотностью 600 $кг/м^3$	2,94	956,56	30,54

Из таблицы 2.3 видно, что наиболее эффективными являются конструкции из легких бетонов.

На рисунке 2.5 представлена зависимость удельных затрат тепловой энергии от плотности материалов ограждений из легких бетонов при прерывистом отоплении.

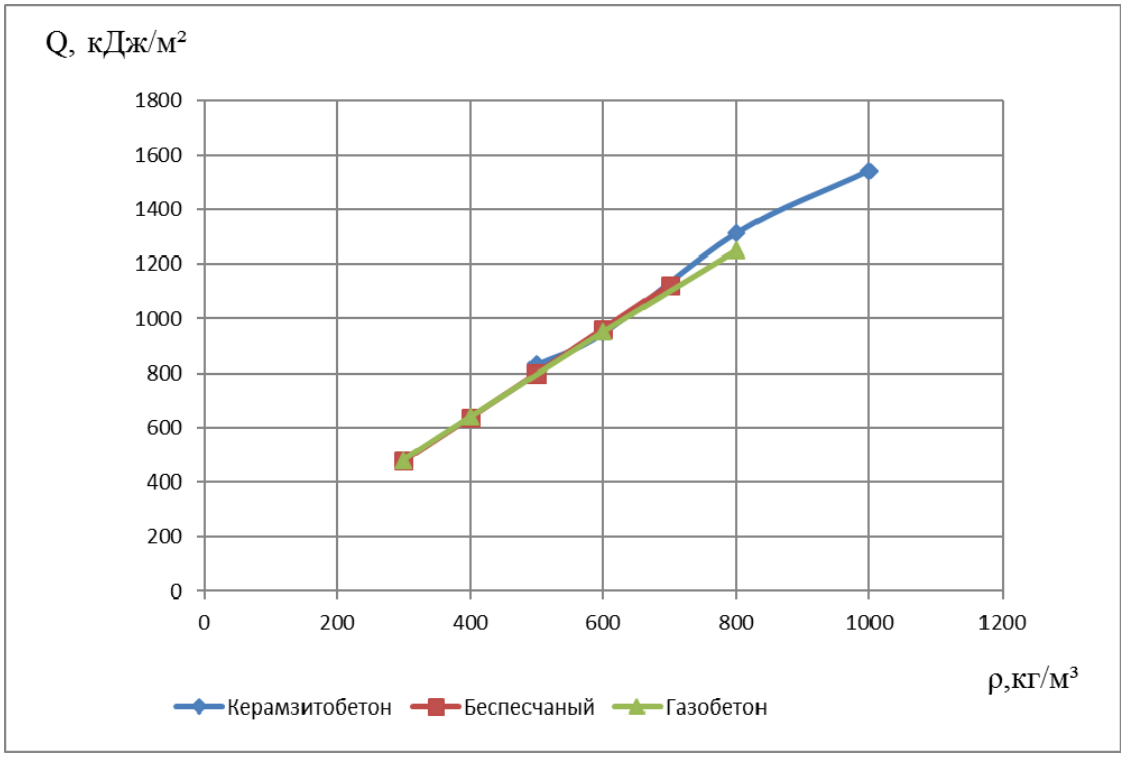


Рисунок 2.5. Зависимость энергозатрат от плотности материала.

На основании данных, представленных на рисунке 2.4, видно, что с увеличением плотности материалов происходит увеличение энергозатрат на нагрев данных конструкций наружных стен.

2.2 Исследование нестационарной теплопередачи в многослойных ограждающих конструкций в условиях прерывистого отопления.

Динамика развития технологий строительства предполагает постепенный отказ от однослойных конструкций (толщиной до 500 мм) и переход на многослойные конструкции, в которых конструкционные слои выполняют теплозащитные или несущие функции. Потребность современного строительства в теплоизоляционных материалах, отвечающих критериям долговечности, комфортности и теплозащите, остается актуальной на сегодняшний день. Главными показателями теплоизоляционных материалов являются: минимальный объемный вес, высокая теплоизоляционная способность и пожаробезопасность.

2.2.1 Определение энергозатрат и времени нагрева многослойных ограждающих конструкций приближенным аналитическим методом.

Время нагрева определяется по формуле:

$$Z_н = 2\frac{Q_н}{q_{от}}\frac{1+2\varphi}{1+\varphi}, \text{ с.} \qquad (2.21)$$

Энергозатраты на нагрев многослойных ограждающих конструкций определяются по формуле:

$$Q_н = \sum_{i=1}^{n} c_i \cdot \rho_i \cdot \delta_i \cdot \Delta\tau_i \ , \text{ кДж/м}^2, \qquad (2.22)$$

Изменение температуры i - го слоя многослойной ограждающей конструкции, наружная поверхность которой соприкасается с наружным воздухом, находим по формуле:

$$\Delta\tau_i = t_{в2} - t_{в1} - \frac{t_{в2} - t_{в1}}{2R_0^{усл.}}\left(\frac{2}{\alpha_в} + \sum_{i=1}^{i-1} R_i + \sum_{i=1}^{i} R_i\right) \ , ^oC, \qquad (2.23)$$

где $t_{в1}$, $t_{в2}$ - температуры внутреннего воздуха при работе дежурного отопления и на расчетном режиме соответственно, ^{o}C.

Для многослойных ограждающих конструкций, наружная поверхность, которых соприкасается с внутренним воздухом неотапливаемых смежных помещений, формула примет следующий вид:

$$\Delta\tau_i = t_{в2} - t_{в1} - \frac{t_{в2} + t_{п1} - t_{в1} - t_{п2}}{2R_0^{усл}}\left(\frac{2}{\alpha_в} + \sum_{i=1}^{i-1} R_i + \sum_{i=1}^{i} R_i\right), \ ^oC, \qquad (2.24)$$

где $t_{п1}$, $t_{п2}$ - температура внутреннего воздуха в смежном неотапливаемом помещении при дежурном отоплении и расчетном режиме соответственно.

2.2.2 Исследование влияния экранной тепловой изоляции на энергозатраты в периодах натопа зданий.

Исследуем влияние экранной тепловой изоляции на время нагрева и энергозатраты ограждающих конструкций в условиях прерывистого отопления. На рисунке 2.6 представлена схематизация процесса через наружную стену, утепленную с помощью экранной тепловой изоляции.

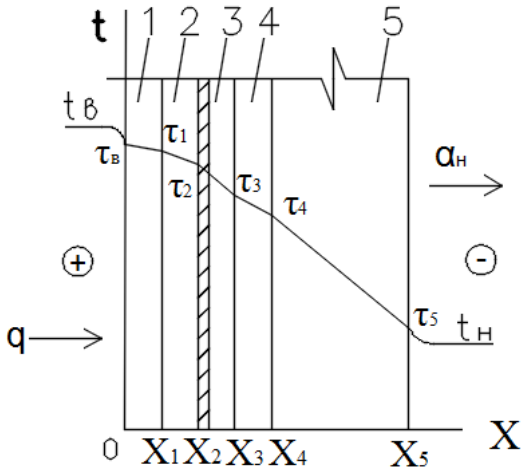


Рисунок 2.6. Схематизация процесса теплопередачи в утепленной наружной стене:
1 – гипсокартонные листы ГКЛО; 2 – воздушная невентилируемая прослойка; 3 – пенофол, защищенный алюминиевой фольгой; 4 – цементно-песчаный раствор; 5 – кладка из мелкоштучных строительных изделий (кирпич, стеновые блоки).

Математическая постановка задачи нестационарного теплообмена в утепленной наружной стене рассматривается при следующих допущениях:

- задача рассматривается в одномерной постановке;

- между слоями рассматривается условие идеального контакта;

- удельный тепловой поток, поступающий от отопительных приборов в процессе нагрева наружной стены, принимаем постоянным;

- в начальный момент времени распределение температур в толще наружной стены соответствует стационарному режиму при работе дежурного отопления.

Математическая постановка имеет вид:

$$-\lambda_1 \frac{\partial t_1}{\partial x} = q\ ;\ x = 0 \tag{2.25}$$

$$\frac{\partial t_1}{\partial z} = a_1 \frac{\partial^2 t_1}{\partial x^2};\ x_0 \le x \le x_1;\ z > 0 \tag{2.26}$$

$$\frac{\partial t_2}{\partial z} = a_2 \frac{\partial^2 t_2}{\partial x^2};\ x_1 \le x \le x_2;\ z > 0 \tag{2.27}$$

$$\lambda_1 \frac{\partial t_1}{\partial x} = \lambda_2 \frac{\partial t_2}{\partial x};\ x = x_1 \tag{2.28}$$

$$t_1 = t_2 = \tau_1;\ x = x_1 \tag{2.29}$$

$$\frac{\partial t_3}{\partial z} = a_3 \frac{\partial^2 t_3}{\partial x^2};\ x_2 \le x \le x_3;\ z > 0 \tag{2.30}$$

$$\lambda_2 \frac{\partial t_2}{\partial x} = \lambda_3 \frac{\partial t_3}{\partial x};\ x = x_2 \tag{2.31}$$

$$t_2 = t_3 = \tau_2;\ x = x_2 \tag{2.32}$$

$$\frac{\partial t_4}{\partial z} = a_4 \frac{\partial^2 t_4}{\partial x^2};\ x_3 \le x \le x_4;\ z > 0 \tag{2.33}$$

$$t_3 = t_4 = \tau_3;\ x = x_3 \tag{2.34}$$

$$\frac{\partial t_5}{\partial z} = a_5 \frac{\partial^2 t_5}{\partial x^2};\ x_4 \le x \le x_5;\ z > 0 \tag{2.35}$$

$$t_4 = t_5 = \tau_4;\ x = x_4 \tag{2.36}$$

$$\lambda_4 \frac{\partial t_4}{\partial x} = \lambda_5 \frac{\partial t_5}{\partial x};\ x = x_4 \tag{2.37}$$

$$-\lambda_5 \frac{\partial t_5}{\partial x} = \alpha_н (\tau_5 - t_н);\ x = x_5 \tag{2.38}$$

$$t_i \big|_{\tau=0} = f_i(x);\ i = 1 \div 5, \tag{2.39}$$

где $f_i(x)$ – начальное распределение температур при наличии дежурного отопления ˚С; τ_i – температуры на стыках слоев, ˚С; t_i – текущие температуры в слоях наружной стены, ˚С;, м^2/с; x_i – расстояния от внутренней поверхности до стыков слоев и наружной поверхности стены;

Эквивалентный коэффициент теплопроводности воздуха определяется по формуле:

$$\lambda_2 = \lambda_м \varepsilon_к + \alpha_л \delta_2, \tag{2.40}$$

где $\lambda_м$ - значение коэффициента теплопроводности воздуха, Вт/(м·ºС); $\varepsilon_к$ - поправочный коэффициент, учитывающий влияние естественной конвекции; $\alpha_л$ - коэффициент теплоотдачи излучением, Вт/(м^2·ºС).

Во всех рассмотренных вариантах используются гипсокартонные листы толщиной δ_1=0,02 м, воздушная прослойка (δ_2=0,01 м), пенофол (δ_3=0,01 м), цементно-песчаный раствор (δ_4=0,015 м). Несущий слой выполнен в виде кладки из силикатного кирпича на цементно-песчаном растворе толщиной 510 и 640 мм, а также пустотелого керамического кирпича толщиной 510 мм. Температура внутреннего воздуха при дежурном отоплении $t_{в1}$ принималась равной 12 ºС, расчетная температура $t_{в2}$ =22 ºС, температура наружного воздуха $t_н = -30$ ºС.

Результаты расчета времени нагрева наружных стен и удельных энергозатрат представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4. Результаты расчета утепленных наружных стен.

№ варианта исполнения наружной стены	Вид кирпичной кладки	$R_0^{усл.}$, (м2·ºС)/Вт	$Z_н$, ч	$Q_н$, кДж/м^2
1	Кладка из силикатного кирпича на цементно-песчаном растворе толщиной 510 мм	1,53	37,7	$\frac{2245}{3656}$
2	Кладка из силикатного кирпича на цементно-песчаном растворе толщиной 640 мм	1,70	56,4	$\frac{3026}{4670}$
3	Кладка из кирпича керамического пустотелого плотностью 1400 кг/м3 на цементно-песчаном растворе толщиной 510 мм	1,74	42,9	$\frac{2255}{3318}$
4	Кладка из кирпича керамического пустотелого плотностью 1300 кг/м3 на цементно-песчаном растворе толщиной 510 мм	1,84	42,0	$\frac{2088}{2924}$

Примечание. В знаменателе приведены значения удельных энергозатрат для неутепленных наружных стен.

Представленные в таблице 2.4 данные по удельным энергозатратам на нагрев наружных стен свидетельствуют о том, что утепление с помощью экранной теплоизоляции позволяет существенно (от 27 до 39%) снизить энергозатраты на нагрев наружных стен.

Как известно, термическое сопротивление экранированной воздушной прослойки, существенно зависит от ее толщины. Проведено исследование влияния толщины воздушной прослойки на энергозатраты при нагреве наружных стен.

Результаты расчетов представлены на рисунке 2.7 в виде зависимости безразмерных удельных энергозатрат ($Q_н/Q_0$) на нагрев наружной стены от толщины воздушной прослойки.

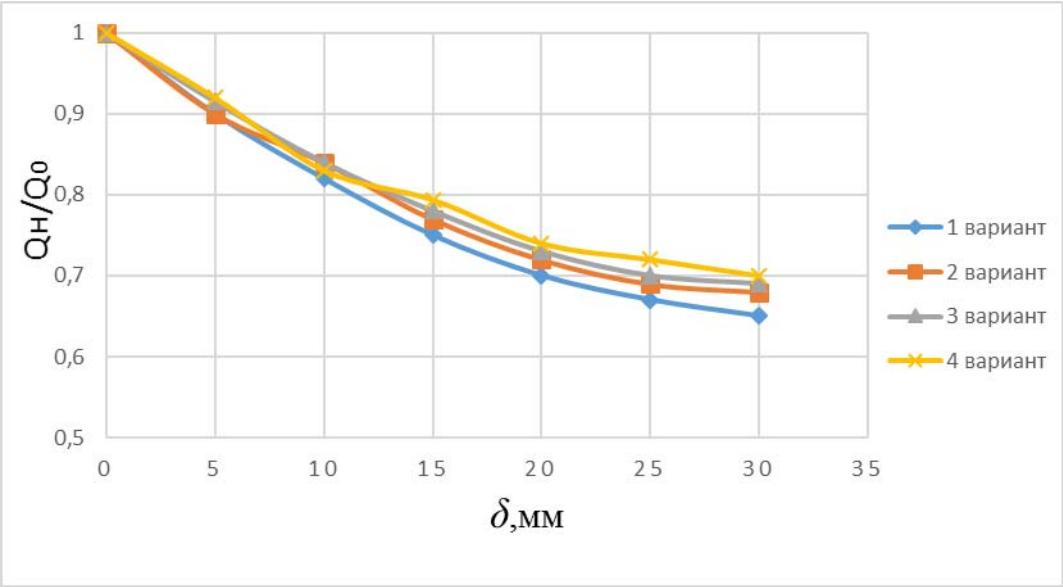


Рисунок 2.7. Зависимость удельных энергозатрат на нагрев наружной стены от толщины воздушной прослойки.

$Q_н, Q_o$ - удельные энергозатраты при наличии и отсутствии воздушной прослойки, кДж/м².

С помощью математических преобразований получена формула для определения энергозатрат на нагрев наружных ограждений в зависимости от толщины воздушной прослойки:

$$Q_н = Q_0 \cdot (1 - 26,2 \cdot \delta + 474,6 \cdot \delta^2)\text{, кДж/м²,} \quad (2.41)$$

где Q_0 - энергозатраты на нагрев ограждений при отсутствии воздушной прослойки, кДж/м²; δ -толщина воздушной прослойки, м.

2.2.3 Анализ целесообразности применения монолитного пенобетона для утепления наружных стен зданий, эксплуатируемых в условиях прерывистого отопления.

Потребность современного строительства в теплоизоляционных материалах, отвечающих критериям долговечности, комфортности и теплозащите, остается актуальной на сегодняшний день. Главными показателями теплоизоляционных материалов являются: минимальный объемный вес, высокая теплоизоляционная способность и пожаробезопасность [9].

Развитие производства разнообразных стеновых конструктивно-теплоизоляционных элементов из ячеистого бетона открывает большой спектр использования данного материала. Наиболее эффективным, в качестве теплоизоляционного слоя, является монолитный пенобетон.

Монолитный пенобетон обладает рядом положительных характеристик:

- широкий диапазон плотностей от 200 до 1600 кг/м^3, что позволяет его использовать как в качестве утеплителя, так и в качестве конструкционного материала;
- низкий коэффициент теплопроводности;
- обладает достаточной огнестойкостью;
- имеет более низкую водопоглощательную способность.

Далее приведена методика возведение наружной стены.

Первым этапом является процесс возведения кладки из силикатного кирпича толщиной 250 мм. Далее монтируется металлический каркас вместе с гипсокартонном. После этого пространство между кирпичной кладкой и гипсокартонном заполняется монолитным пенобетоном по высоте за 4 раза.

Данное решение позволяет ускорить возведение наружных конструкций, устранить сезонность работ, снизить конечную стоимость строительства за счет совмещения производства работ.

Ниже представлен расчет, выполненный по рассмотренной выше методике, двух вариантов исполнения ограждающих конструкций (рисунок 2.8 - 2.9) для определения времени нагрева и удельных энергозатрат.

Результаты расчетов сведены в таблицу 2.5.

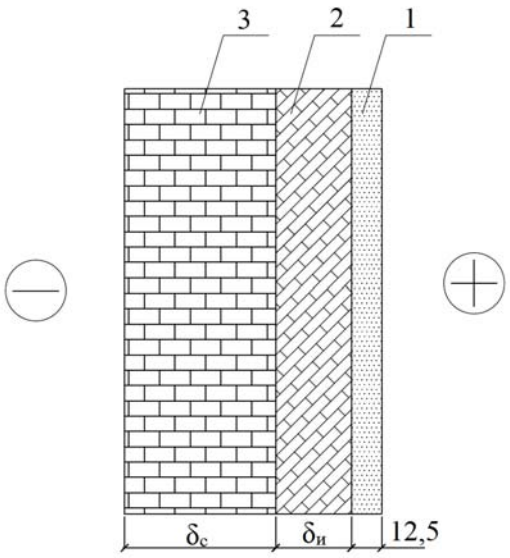


Рисунок 2.8. Конструкция наружной стены с внутренним утеплением.

1 – гипсокартон: δ_1=0,0125 м; γ_1=800 кг/м^3; λ_1=0,19 Вт/(м °С); c_1=0,8 кДж/(кг·°С);

2 – монолитный пенобетон: γ_2=300 кг/м^3; λ_2=0,1 Вт/(м°С); c_2=0,84 кДж/(кг·°С);

3 – силикатный кирпич: γ_3=1800 кг/м^3; λ_3=0,76 Вт/(м°С); c_3=0,8 кДж/(кг·°С).

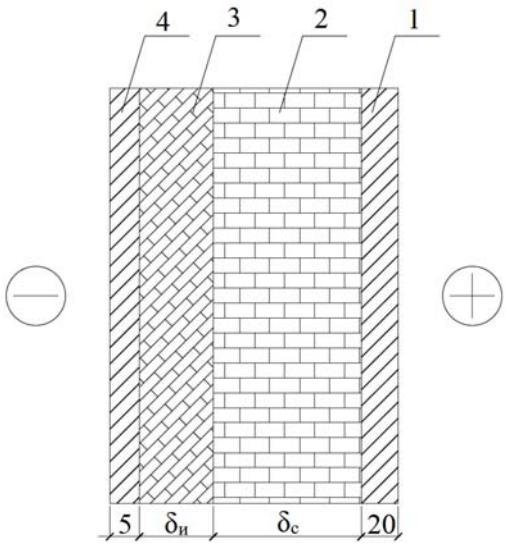


Рисунок 2.9. Конструкция наружной стены с наружным утеплением.

1 – цементно - песчаный: раствор δ_1=0,02 м, γ_1=1800 кг/м^3; λ_1=0,76 Вт/(м·ºС); c_1 =0,84 кДж/(кг·ºС);

2 – силикатный кирпич: γ_2=1800 кг/м^3; λ_2=0,76 Вт/(мºС); c_2=0,84 кДж/(кг·ºС);

3 – монолитный пенобетон: γ_3=300 кг/м^3; λ_3=0,1 Вт/(мºС); c_3=0,84 кДж/(кг·ºС);

4 – фактурный слой фасадной системы: δ_4=0,005 м, γ_4=1800 кг/м^3; λ_4=0,76 Вт/(м·ºС); c_4=0,84 кДж/(кг·ºС).

Таблица 2.5. Результаты расчета процесса нагрева многослойных наружных ограждений.

№	Конструкция наружной стены	Толщина кладки δс,мм	Толщина теплоизоляции δи,мм	Сопротивление теплопередаче, (м²·°С)/Вт	Удельные энергозатраты, кДж/м²	Время нагрева ограждающей конструкции Zн,ч
1	Рис.2.8	120	180	2,18	334	7,9
2		250	170	2,25	595	14,6
3		382	150	2,22	1016	24,6
4		510	130	2,2	1605	38,4
5		640	120	2,27	2285	56,4
6	Рис.2.9	120	190	2,25	1885	46,2
7		250	170	2,22	3499	84,7
8		380	150	2,19	4953	118,3
9		510	140	2,26	6321	155,8
10		640	120	2,23	7474	181,9

На рисунке 2.10 и 2.11 представлены графики влияния толщины слоя утепления на энергозатраты и время нагрева ограждений при внутреннем и наружном утеплении.

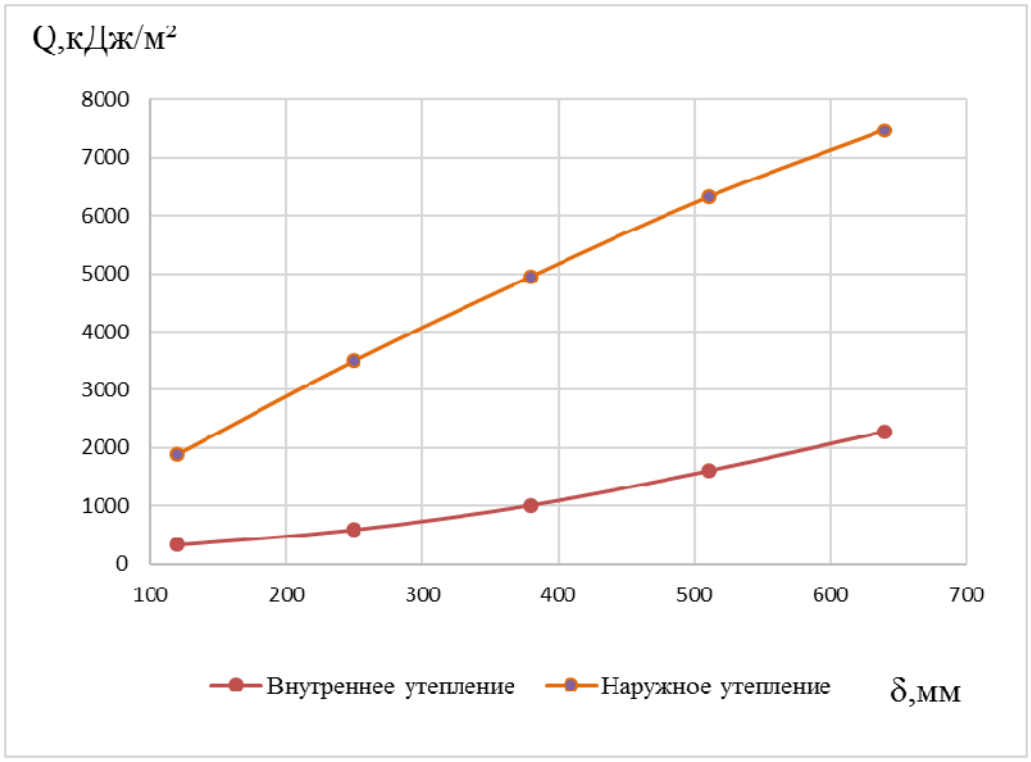


Рисунок 2.10. Зависимость удельных энергозатрат от толщины ограждающих конструкций с внутренней и наружной изоляцией.

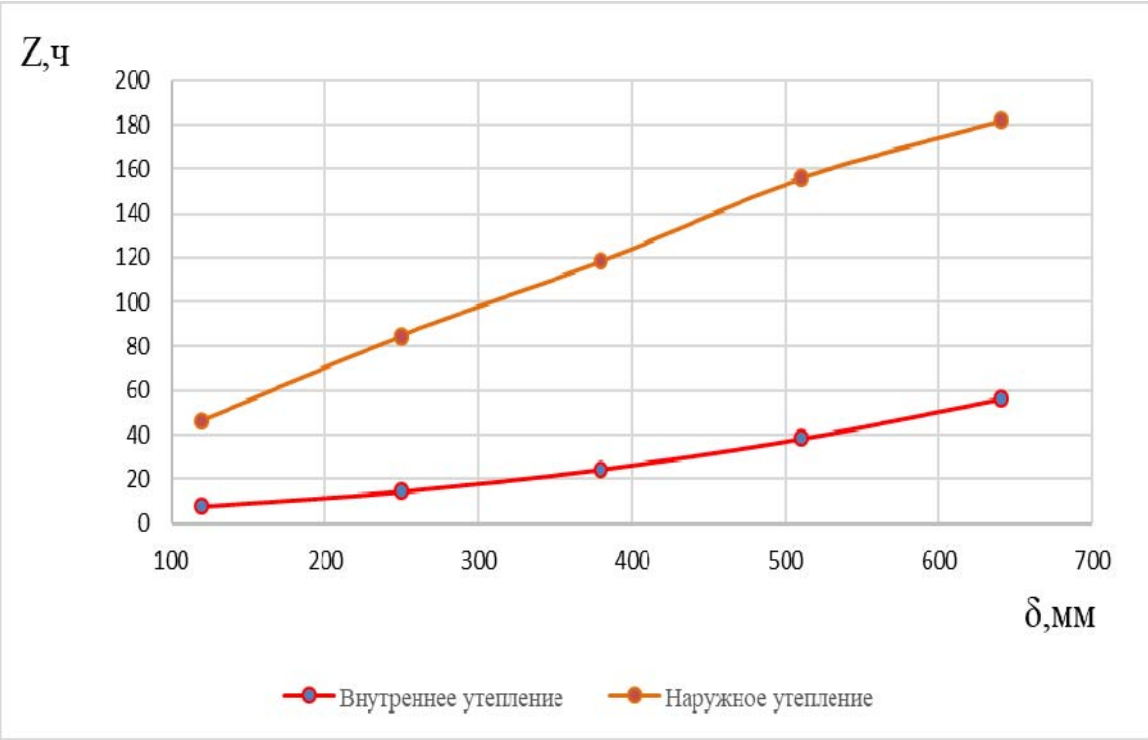


Рисунок 2.11. Зависимость времени нагрева от толщины ограждающих конструкций с внутренней и наружной изоляцией.

Расчеты показали, что использование монолитного пенобетона в качестве внутреннего теплоизоляционного слоя позволяет существенно снизить удельные затраты энергии и время нагрева конструкции.

Теплофизический расчет наружных ограждений с внутренним утеплением, включающий расчет влажностного режима, представлен в приложении А. Расчет показал на необходимость установки пароизоляционного слоя со стороны внутренней поверхности монолитного пенобетона. В качестве пароизоляции предложено использовать гидро-пароизоляционную пленку марки «Изоспан-С».

2.2.4 Особенности теплотехнического расчета чердачных и цокольных перекрытий зданий при прерывистом отоплении.

Наряду с наружными стенами основные тепловые потери помещений происходят через перекрытия над подвалами и чердаками. Особенность теплотехнического расчета таких ограждений заключается в том, что их наружная поверхность соприкасается с внутренним воздухом

неотапливаемых помещений, температура которого определяется из теплового баланса рассматриваемых помещений. Ниже представлена методика расчета таких перекрытий.

Время нагрева определяется по формуле:

$$Z_н = 2\frac{Q_н}{q_{от}}\frac{1+2\varphi}{1+\varphi}, \text{ с}, \qquad (2.42)$$

Затраты тепловой энергии на нагрев многослойной конструкции перекрытия определим по формуле:

$$Q_н = \sum_{i=1}^{n} c_i \cdot \rho_i \cdot \delta_i \cdot \Delta\tau_i \quad , \text{Дж/м}^2, \qquad (2.43)$$

Для многослойных чердачных и цокольных перекрытия, наружная поверхность, которых соприкасается с внутренним воздухом неотапливаемых смежных помещений, изменение температуры i - го слоя определяется по формуле:

$$\Delta\tau_i = t_{в2} - t_{в1} - \frac{t_{в2} + t_{н1} - t_{в1} - t_{н2}}{2R_0^{усл.}}\left(\frac{2}{\alpha_в} + \sum_{i=1}^{i-1} R_i + \sum_{i=1}^{i} R_i\right), \ ^oC. \qquad (2.44)$$

Ниже представлен теплотехнический расчет перекрытия над неотапливаемым подвалом, представленного на рисунке 2.12.

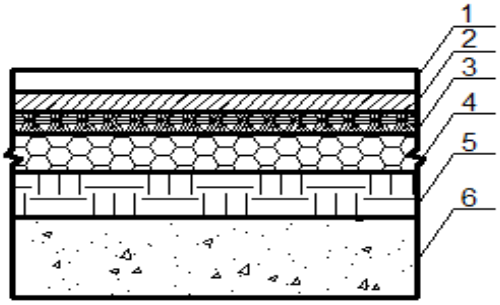


Рисунок 2.12. Конструкция перекрытия над неотапливаемым подвалом коттеджа.

Состав конструкции перекрытия представлен в таблице 2.6.

Таблица 2.6. Исходные данные для расчета.

№ слоя	Материал слоя	Толщина, δ_i, м	Плотность ρ_i, кг/м³	Теплоемкость c_i, кДж/кг·°С	Коэффициент теплопроводности λ_i, Вт/м·°С
1	линолеум	0,0015	1000	1,47	0,33
2	подоснова	0,002	150	1,8	0,047
3	битумная мастика	0,001	1000	1,68	0,17
4	монолитный пенобетон	0,03	400	0,84	0,14
5	пеноплекс	0,04	30	1,34	0,03
6	ж/б плита перекрытия	0,12	2400	0,84	1,74

В результате расчета получено значение сопротивления теплопередаче перекрытия $R_0^{усл.}=1{,}94$ (м²°С)/Вт, а также коэффициента теплоусвоения пола $Y_П=4{,}99$ Вт/(м²°С), при нормативных значениях $R_o^{тр}=1{,}71$(м²°С)/Вт, $Y_Н=12$ Вт/(м²°С).

Выполним расчеты по определению энергозатрат и времени нагрева перекрытия в процессе натопа помещения при следующих начальных параметрах: расчетное значение температуры внутреннего воздуха коттеджа составляет $t_{в2}$=22 °С, при дежурном отоплении температура внутреннего воздуха равна $t_{в1}$=12 °С, температура наружного воздуха $t_н$= -30 °С [12].

Источником отопления коттеджа является индивидуальный газовый котел, мощностью 20 кВт. Котельная расположена в подвале здания.

Стены подвала расположены ниже уровня земли, они утеплены следующей теплоизоляционной конструкцией:

1 – пеноплекс толщиной 100 мм; 2 – цементно – песчанный раствор толщиной 20 мм; 3 – защитный поверхностный слой битума.

План коттеджа представлен в приложении Б.

В результате расчета, произведенного по методике, изложенной в СП 23-101-2004 [68], температура воздуха в подвале при дежурном отоплении составила 2,9 ˚С, при расчетном режиме – 7,1 ˚С.

В таблице 2.7 представлены результаты расчета нагрева отдельных слоев перекрытия.

Таблица 2.7. Результаты расчета процесса нагрева перекрытия.

№ слоя	Изменение температуры i-го слоя, ΔZi, ?С	Кол-во теплоты, затраченное на нагрев i-го слоя Qi,кДж/м²	Отношение теплоты, затраченное на нагрев i-го слоя к теплоте, затраченной на нагрев всей конструкции $\frac{Q_i}{Q_н}\cdot 100,\%$
1	9,65	21,3	1,64
2	9,58	5,17	0,4
3	9,5	15,96	1,23
4	9,17	92,4	7,12
5	6,86	11,03	0,85
6	4,76	1151,5	88,8

На рисунке 2.13 представлена зависимость энергозатрат, затраченных на нагрев слоев конструкции перекрытия, от термического сопротивления.

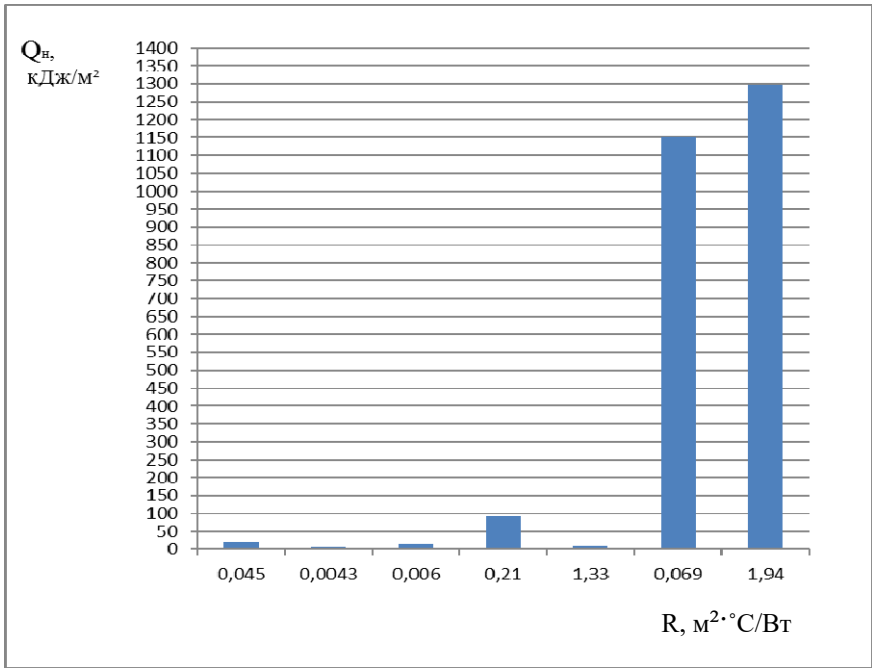


Рисунок 2.13. Зависимость энергозатрат от термического сопротивления слоев конструкции перекрытия.

Значения термического сопротивления теплопередаче соответствуют данным, полученным в результате теплотехнического расчета каждого слоя и всей конструкции в целом.

Время нагрева перекрытия над неотапливаемым подвалом составило 85 часов.

2.3 Экспериментальное исследование процесса нагрева стены.

Для подтверждения результатов математического моделирования процесса нагрева наружных ограждений был проведен эксперимент в климатической камере по определению времени нагрева стены.

Сопротивление теплопередаче ограждения определялось по методике, указанной в ГОСТ 26254-84 [27]. Охлаждение наружной стены, установленной в климатической камере осуществлялось в течение 3-х суток до достижения стационарного теплового режима при температуре внутреннего воздуха $t_в = 17$ ºС и температуре в холодном отсеке $t_н = -26$ ºС.

Данный тепловой режим соответствовал режиму дежурного отопления.

Протоколы испытаний представлены в приложении В.

Стена выполнена в виде кладки из пустотелых керамзитобетонных блоков на цементно - песчаном растворе δ=0,25 м, γ=800 кг/м^3;
λ=0,24 Вт/(м·ºС); с =0,84 кДж/(кг·ºС). С внутренней и наружной стороны стены нанесен цементно - песчаный раствор $\delta_в$=0,015 м, $\delta_н$=0,010 м,
γ=1800 кг/м^3; λ=0,76 Вт/(м·ºС); с =0,84 кДж/(кг·ºС).

По результатам обработки экспериментальных данных сопротивление теплопередаче составило $R_0 = 1,23$ (м^2·˚С)/Вт.

Для реализации процесса натопа помещения со стороны внутренней поверхности стены был смонтирован теплый отсек из листов гипсокартона, натоп в котором осуществлялся с помощью масляного радиатора. В процессе натопа и охлаждения внутреннего воздуха в теплом отсеке происходила регистрация температуры и удельного теплового потока на поверхности стены с помощью прибора ИТП-МГ4.03 «ПОТОК», температуры и относительной влажности внутреннего воздуха - с помощью прибора CENTER 313. Результаты испытаний представлены на рисунке 2.15.

На рисунке 2.14 представлен фрагмент исследуемой стены.

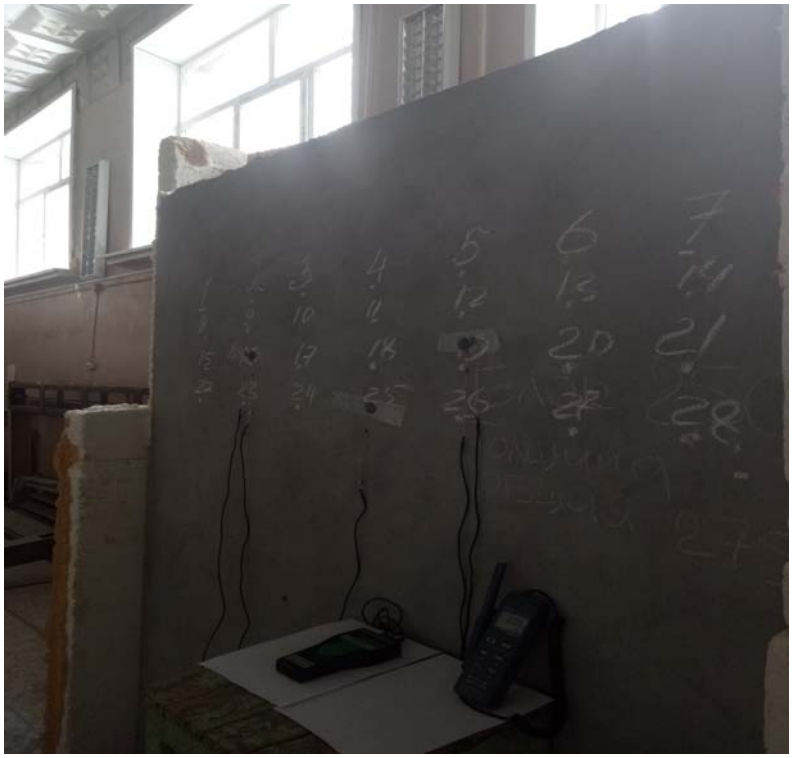


Рисунок 2.14. Фрагмент наружной стены.

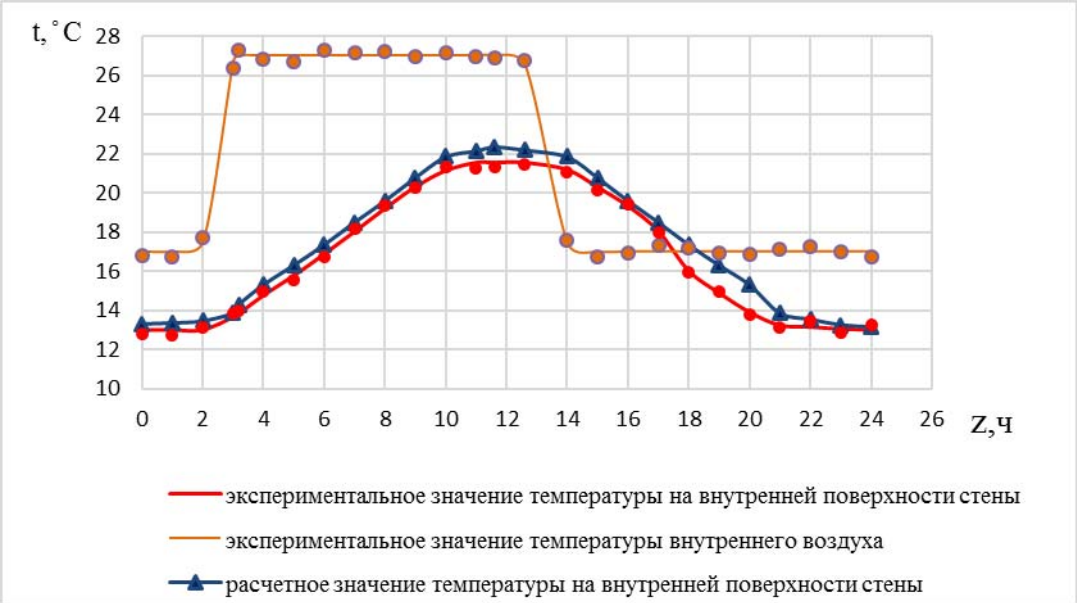


Рисунок 2.15. Результаты исследования процесса нестационарной теплопередачи через наружную стену.

По результатам математической обработки экспериментальных данных были получены формулы для определения температур на внутренней поверхности ограждения в процессе его нагрева (2.45) и охлаждения (2.47).

$$\tau_в = \tau_{в1} + \Theta_в \cdot \left(\tau_{в2} - \tau_{в1}\right) \ ^\circ\text{C}, \qquad (2.45)$$

где $\Theta_в$ - безразмерная температура на внутренней поверхности ограждения:

$$\Theta_в = 0{,}95 \cdot \left(1 - e^{\frac{-Z}{Z_н - Z}}\right); \qquad (2.46)$$

$\tau_{в1}, \tau_{в2}$ – температура на внутренней поверхности ограждения при работе системы отопления в дежурном и стационарном режимах соответственно, ˚С;

$Z, Z_н$ – момент времени и полное время нагрева стенки соответственно, ч.

$$\tau_в = \tau_{в2} - \Theta_в \cdot \left(\tau_{в2} - \tau_{в1}\right) \ ^\circ\text{C}, \qquad (2.47)$$

где: $$\Theta_в = 0{,}95 \cdot \left(1 - e^{\frac{-Z}{Z_{охл} - Z}}\right);$$ (2.48)

$Z, Z_{охл}$ – момент времени и полное время остывание стенки соответственно, ч;

$$Z_{охл} = \frac{Q_н}{q_{ср} \cdot 3600}, \text{ ч},$$ (2.49)

где $Q_н$ - энергозатраты на нагрев ограждения, Дж/м², определяемые по формулам (2.11, 2.15);

$q_{ср}$ - среднее значение удельного теплового потока, Вт/м²:

$$q_{ср} = \frac{q_1 + q_2}{2}, \text{ Вт/м}^2 \ ,$$ (2.50)

$$q_1 = \frac{t_{в1} - t_н}{R_0}, \text{ Вт/м}^2;$$

$$q_2 = \frac{t_{в2} - t_н}{R_0}, \text{ Вт/м}^2 .$$

Время нагрева стенки по результатам экспериментальных данных составило 10,56 ч, расчетное значение приближенным аналитическим методом составило 9,92 ч. Погрешность полученных значений составило 6%.

2.4 Особенности расчета темпа остывания помещений.

Вопросы остывания помещения изложены в работах [48]. Соколовым Е.Я. [73] предложена формула для определения температуры внутреннего воздуха через время Z после изменения теплового режима в помещении вида:

$$t_в = t_н + \left(t_в - t_н\right) \cdot e^{-\frac{Z}{\beta}}, °\text{C},$$ (2.51)

где $t_в, t_н$ – температура внутреннего и наружного воздуха соответственно, °С; Z – время остывания помещения, ч; β – коэффициент теплоаккумулирующей способности здания, ч.

Методика расчета коэффициента теплоаккумулирующей способности рассмотрена в работе Канoновича Ю.В. [48].

Формула для определения коэффициента β выглядит следующем образом:

$$\beta = \frac{C_{огр.}}{3{,}6 \cdot Q_{уд.}}, \text{ ч}, \tag{2.52}$$

где $C_{огр.}$ – теплоемкость ограждений, кДж/°С; $Q_{уд.}$ – удельные тепловые потери помещения, Вт/°С.

Величину $C_{огр.}$ определяем по формуле:

$$C_{огр.} = K_t \cdot \sum_{i=1}^{n} \delta_i \cdot c_i \cdot \rho_i \cdot \frac{F_i}{2}, \text{ кДж/°С}, \tag{2.53}$$

где δ_i – толщина ограждения, м; c_i – теплоемкость материала ограждения, кДж/кг·°С; ρ_i – плотность материала ограждения, м³/кг; F_i – площадь ограждения, м²; $K_t = \frac{\tau_R - t_н}{t_в - t_н}$ – безразмерный коэффициент; τ_R – радиационная температура ограждения, °С.

$$\tau_R = \frac{\sum_{i=1}^{n} \tau_i \cdot F_i}{\sum_{i=1}^{n} F_i}, \text{ °С}, \tag{2.54}$$

где τ_i – температура внутренней поверхности ограждения, °С.

$$\tau_i = t_{во} - \frac{t_{во} - t_н}{R_o^{пр} \cdot \alpha_в}, \text{ °С}.$$

Формула для определения удельных тепловых потерь:

$$Q_{уд.} = \sum_{i=1}^{n} K_i \cdot F_i + L \cdot c_в \cdot \rho_в, \text{ Вт/°С}, \tag{2.55}$$

где K_i – коэффициент теплопередачи наружной ограждающей конструкции, Вт/(м²·°С); L – расход приточного воздуха из расчета 3 м3/ч на 1 м² жилой площади.

В приложении Д представлен расчет темпа остывания одной комнаты коттеджа, план которого представлен в приложении Б, рисунок Б.1., исходные данные для расчета представлены в параграфе 5.2.

2.5 Экспериментальные исследования теплозащитных характеристик ограждающих конструкций энергоэффективных зданий с применением беспесчаного керамзитобетона.

Представленные в п. 2.1.2 результаты расчета времени нагрева и удельных энергозатрат при натопе помещений для зданий с прерывистым отоплением показали целесообразность применения беспесчаного керамзитобетона при возведении наружных стен.

Предприятие ООО «Витатерм» г. Тольятти одно из первых в Самарской области освоило производство по собственной запатентованной технологии полнотелых керамзитобетонных камней плотность 600 и 700 кг/м³ с высокими теплозащитными свойствами.

Указанный выше материал сочетает в себе также прочностные свойства, высокую морозостойкость, долговечность, низкую эксплуатационную влажность, огнестойкость и пожарную безопастность.

Для оценки теплозащитных характеристик ограждающих конструкций загородных коттеджей, построенных с применением стеновых блоков из беспесчаного керамзитобетона было произведено их тепловизионное обследование с применением тепловизора марки Thermo CAM B2.

Результаты обследования представлены в приложение Е.

На рисунке 2.16 представлена фотография здания коттеджа, расположенного по адресу: Самарская область, Ставропольский район, село Подстепки, ул. Зеленая, д.10.

Рисунок 2.16. Здание коттеджа.

Состав конструкции наружной стены представлен на рисунке 2.17.

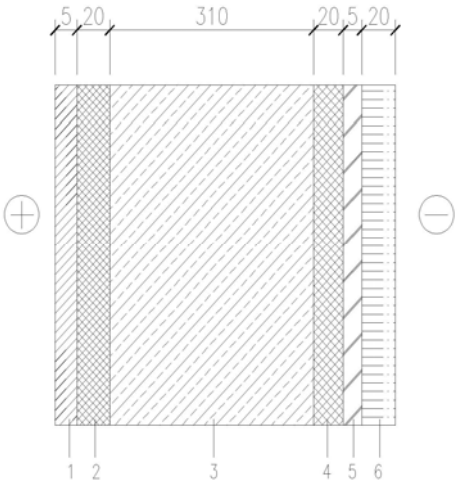


Рисунок 2.17. Состав конструкции наружной стены.

1– шпатлевка гипсовым раствором;

2,4 – фактурные слои из беспесчаного керамзитобетона;

3– беспесчаный керамзитобетон;

5 – плиточный клей;

6 – облицовочные плитки.

Тепловизионное обследование проводилось при температуре $t_н = -5\,°C$ как изнутри помещений коттеджа, так и со стороны фасадов здания.

Важнейшие тепловизионные характеристики беспесчаного керамзитобетона – коэффициенты теплопроводности и паропроницаемости были определены в аккредитованной лаборатории теплотехнических испытаний СамГТУ в соответствии с ГОСТ 7076-99 [26]. Испытания проводились как в сухом состоянии, так и во влажном в условиях эксплуатации А и Б. Результаты испытаний образцов из беспесчаного керамзитобетона приведены в приложение Е.

В результате проведенных исследований сопротивление теплопередаче наружных ограждений составило: R_0=2,49 и 2,37 (м²·˚С)/Вт, что превышает нормативное значение R_0=2 (м²·˚С)/Вт при реализации потребительского подхода для жилых зданий Самарского региона [69].

2.6 Выводы по главе 2.

1.Получены приближенные аналитические зависимости для определения энергозатрат и времени нагрева ограждающих конструкций зданий, эксплуатируемых в условиях прерывистого отопления.

2. Проведено исследование по определению энергозатрат и времени нагрева различных однослойных и многослойных ограждений с внутренним и наружным утеплением.

3.Проведенные исследования процесса нестационарной теплопередачи наружных стен, утепленных экранной тепловой изоляцией с применением фольгированного пенофола с воздушной прослойкой, показали на снижение энергозатрат на их нагрев от 27 до 39 %.

4.Установлена аналитическая зависимость между энергозатратами на нагрев ограждающих конструкций и толщиной воздушной прослойки.

5. Проведен эксперимент в климатической камере по определению времени нагрева многослойной плоской стенки. Результаты экспериментальных данных отличаются от расчетных значений на 6 %.

Получены формулы для определения температур на внутренней поверхности ограждения в процессе его нагрева и охлаждения.

ГЛАВА 3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В ОТОПИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРАХ.

3.1 Тепловой баланс отапливаемого помещения.

В зданиях и сооружениях при использовании режима прерывистого отопления расчетная температура внутреннего воздуха обеспечивается лишь в период пребывания людей в отапливаемых помещениях. Тепловую мощность системы отопления определяют в соответствии с тепловыми потерями при температуре наиболее холодной пятидневки обеспеченностью 0,92. Запишем выражение для определения мощности системы отопления:

$$Q_{от} = Q_{пот} - Q_{выд}, \text{ Вт}, \quad (3.1)$$

где $Q_{пот}$ - тепловые потери, Вт; $Q_{выд}$ - тепловыделения в помещении, Вт.

$$Q_{пот} = Q_{огр} + Q_{инф}, \text{ Вт}, \quad (3.2)$$

$Q_{огр}$ - потери тепла через наружные и внутренние стены, оконные и дверные проемы, перекрытия над полом и потолком, Вт; $Q_{инф}$ - потери тепла на нагрев наружного воздуха, поступающего через неплотности оконных конструкций, Вт.

Система отопления состоит из трех основных элементов [6]:

- тепловой источник (котел, теплогенератор);
- отопительные приборы (радиаторы, конвекторы);
- трубопроводы (стальные, пластмассовые).

При подборе отопительных приборов на основании расчета тепловых потерь помещения необходимо учитывать теплоотдачу от открыто проложенных трубопроводов.

Нередки случаи, когда при индивидуальном строительстве от одного теплового источника тепла отапливаются несколько зданий и сооружений, находящихся на относительно большом расстоянии друг от друга. В связи с

этим, немаловажным фактором является потеря тепла при транспортировке теплоносителя от источника тепла к отопительным приборам. Теплоотери при транспортировке теплоносителя в изолированных трубопроводах согласно [18] достигают до 20 % тепловой мощности.

При эксплуатации зданий и сооружений в режиме дежурного отопления возникает потребность за короткий промежуток времени выполнить натоп помещения до нормируемой температуры воздуха. Этот процесс происходит при увеличении температуры теплоносителя в системе отопления путем изменения мощности на источнике тепла. Важную роль в данном тепловом процессе отводится отопительным приборам. Задача таковых состоит в максимальной теплоотдаче тепла через минимальный промежуток времени с момента изменения мощности на источнике. В связи с этим, при эксплуатации зданий и сооружений, в режиме дежурного отопления рационально использовать отопительные приборы с минимальным временем нагрева, т.е. приборы, относящиеся к безинерционным.

3.2. Математическое моделирование процесса нестационарной теплопередачи в отопительных приборах.

Процесс теплопередачи в отопительных приборах в процессе натопа помещений является нестационарным. Величина удельного теплового потока, передаваемого от радиатора в помещение, является переменной величиной, определяемой согласно по формуле:

$$q_{н} = q_{от} \cdot (1 - \frac{t - t_{в}}{t_{\max} - t_{в}}) \text{ , Вт/м}^2 \text{ ,} \qquad (3.3)$$

где: $q_{от}$ - удельный тепловой поток, передаваемый от радиатора на стационарном расчетном режиме эксплуатации здания, Вт/м^2; $t_{в}$ - средняя температура воздуха в помещении за период нагрева радиатора, ^{o}C; t_{max} - максимальное значение температуры радиатора, соответствующее расчетному стационарному режиму, ^{o}C; t - значение температуры стенки радиатора в процессе ее нагрева, ^{o}C .

Удельный тепловой поток $q_{от}$, поступающий от отопительного прибора в помещение находим согласно по формуле:

$$q_{от} = \alpha \cdot (t_{\max} - t_{н}), \text{ Вт/м}^2, \quad (3.4)$$

где: α - величина коэффициента теплоотдачи радиатора, определяемая по результатам сертификационных испытаний, приведенная в паспорте на отопительный прибор, Вт/м² ˚С.

Выражение $\frac{t - t_{в}}{t_{\max} - t_{в}}$ в формуле (3.3) имеет нулевую размерность и его логично рассматривать как безразмерную температуру θ нагрева стенки радиатора, т.е.

$$\theta = \frac{t - t_{в}}{t_{\max} - t_{в}} \ . \quad (3.5)$$

Для оценки динамических характеристик отопительных приборов составим дифференциальное уравнение, описывающее процесс их нагрева при натопе помещений. Уравнение теплового баланса отопительного прибора для бесконечно малого промежутка времени примет вид:

$$dQ_1 = dQ_2 \ , \text{Дж} \ , \quad (3.6)$$

где: dQ_1 - элементарное количество тепла, идущее на нагрев радиатора, Дж; dQ_2 - элементарное количество тепла, поступающее от радиатора в помещение, Дж.

$$dQ_1 = m \cdot c \cdot dt \ , \text{Дж}, \quad (3.7)$$

где: m – масса отопительного прибора, кг; c – удельная теплоемкость материала, $Дж / кг \cdot С$; dt - элементарное приращение температуры, °С.

$$dQ_2 = q_{н} \cdot F_{ст} \cdot dZ \ , \text{Дж}, \quad (3.8)$$

где F_{cm} – поверхность теплообмена отопительного прибора, $м^2$; dZ – элементарный промежуток времени, с.

После подставки выражений (3.7), (3.8) в уравнение теплового баланса (3.6) получим дифференциальное уравнение относительной безразмерной температуры вида:

$$\frac{d\theta}{1-\theta} = \frac{\alpha \cdot F_{cm}}{m \cdot c} \cdot dZ \,. \tag{3.9}$$

Интегрируя уравнения (3.9), получим аналитическую зависимость для определения безразмерной температуры стенки радиатора вида:

$$\theta = 1 - e^{\frac{\alpha \cdot F_{cm}}{m \cdot c} \cdot Z} \,. \tag{3.10}$$

Для нахождения времени нагрева радиатора необходимо в формуле (3.10) принять $\theta = 0{,}95$.

Тогда получим

$$Z_н = 3 \cdot \frac{m \cdot c}{\alpha \cdot F_{cm}} \text{ с.} \tag{3.11}$$

Энергозатраты на нагрев отопительного прибора в процессе натопа помещения определяются по формуле:

$$Q_н = c \cdot m \cdot \Delta t, \text{ кДж,} \tag{3.12}$$

где c – удельная теплоемкость, кДж/кг ºС; m – масса одной секции, кг; Δt – разность температур.

В таблице 3.1 приведены результаты расчета энергозатрат и времени нагрева различных отопительных приборов, выполненных по приведенным выше формулам.

Таблица 3.1. Результаты расчета процесса нагрева отопительных приборов.

№	Наименование параметров	Едн. изм	Формула или обозначение	Численные значения		
				Чугунные МС-140-108	Биметалл	Алюминиевые Polo Plus 500
1	Поверхность нагрева	м²	f	0,244	0,484	0,484
2	Масса одной секции	кг	m	7,12	1,95	1,07
3	Разность температур	°С	Δt	44	42,2	42,2
4	Теплоотдача	кВт	qот	0,16	0,18	0,18
5	Удельная теплоёмкость	кДж/кг°С	c	0,482	0,73	0,93
6	Количество тепла, необходимое для выхода на стационарный режим	кДж	Qн	151,0	60,1	42,0
7	Время выхода на стационарный режим	час	Zн	0,79	0,28	0,18
8	Коэф-т теплоотдачи	Вт/м2 °С	α	14,90	8,81	9,30

В таблице 3.2 и на рисунке 3.1 представлены данные по изменению безразмерной температуры стенки отопительных приборов в процессе их нагрева.

Таблица 3.2. Зависимость безразмерной температуры отопительных приборов от времени.

Чугунный		Биметаллический		Алюминиевый	
Время, мин	θср	Время, мин	θср	Время, мин	θср
0	0,000	0	0,000	0	0,000
5	0,361	5	0,582	5	0,694
10	0,592	10	0,825	10	0,906
15	0,739	15	0,927	15	0,971
20	0,834	20	0,970	20	0,991
25	0,894	25	0,987	25	0,997
30	0,932	30	0,995	30	0,999
35	0,957	35	0,998	35	1,000
40	0,972	40	0,999	40	1,000
45	0,982	45	1,000	45	1,000
50	0,989	50	1,000	50	1,000
55	0,993	55	1,000	55	1,000
60	0,995	60	1,000	60	1,000
65	0,997	65	1,000	65	1,000
70	0,998	70	1,000	70	1,000
75	0,998	75	1,000	75	1,000
80	0,999	80	1,000	80	1,000
85	1,000	85	1,000	85	1,000
90	1,000	90	1,000	90	1,000

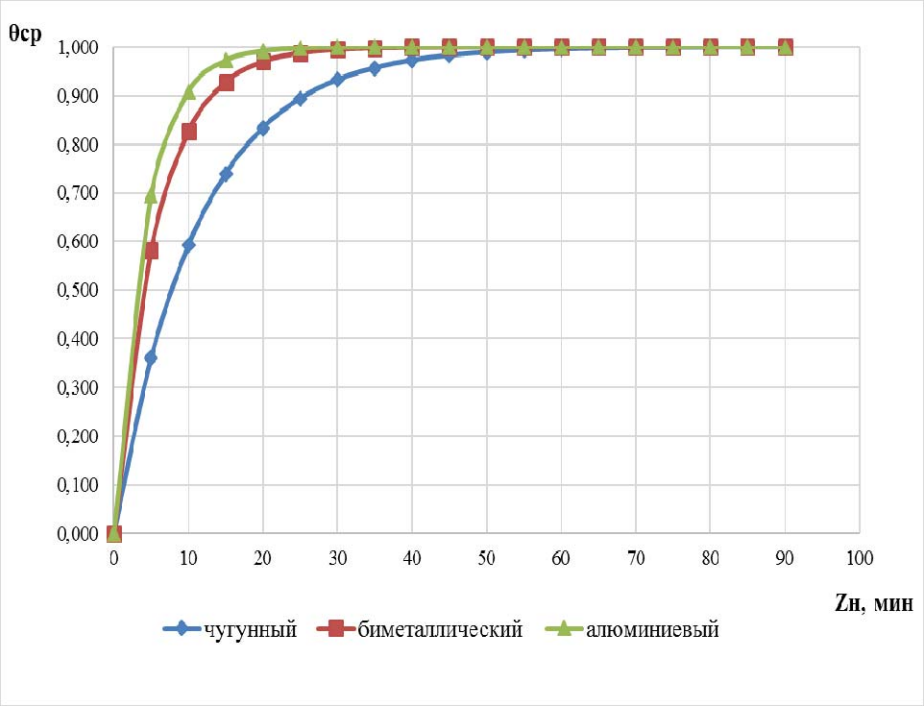


Рисунок 3.1. Зависимость безразмерной температуры отопительных приборов от времени.

Из представленных на рисунке 3.1 данных видно, что максимальное время нагрева имеет чугунный радиатор (τ=47,4 мин.), алюминиевый радиатор минимальное (τ=10,8 мин.) и промежуточное значение имеет биметаллический радиатор (τ=16,8 мин.).

3.3 Экспериментальное исследование процесса нагрева отопительных приборов.

Для подтверждения результатов математического моделирования был проведен эксперимент с использованием экспериментальной установки (рисунок 3.2), созданной в стенах СамГТУ.

В процессе эксперимента регистрировалось изменение во времени следующих координат объекта – теплоотдача отопительного прибора в трёх характерных точках на её поверхностях, температура теплоносителя на входе и выходе радиатора, расход и давление воды в соединительных трубопроводах, температура и влажность в помещении.

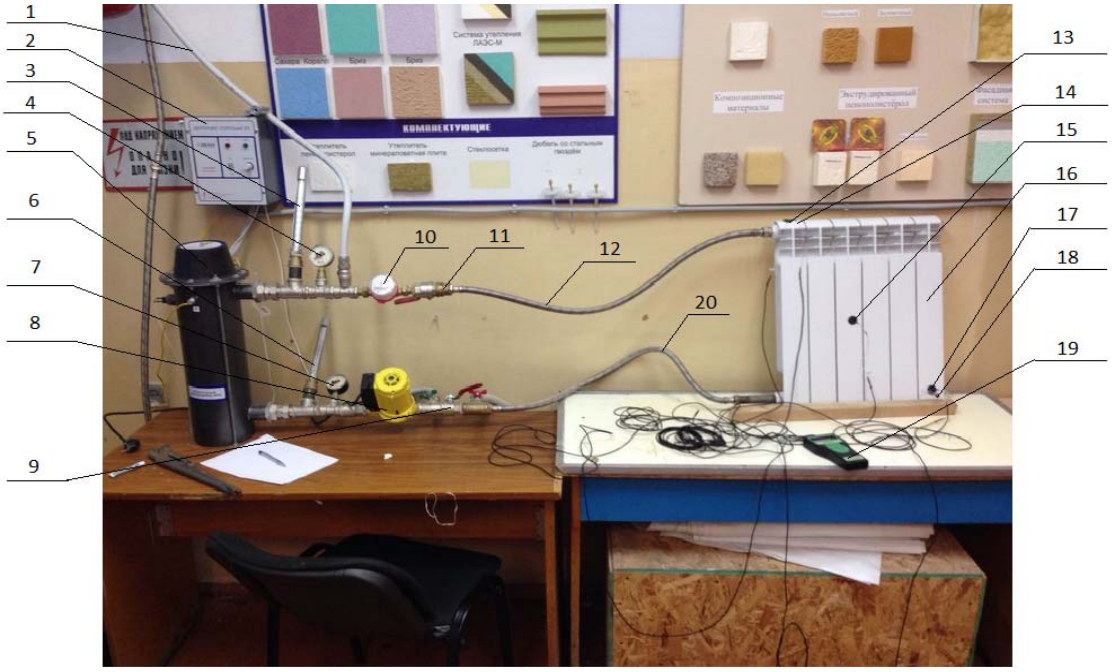


Рисунок 3.2. Экспериментальный стенд.

Разработанный экспериментальный стенд (рисунок 3.2) включает в себя:

1. Электрический котёл (*5)* марки Эван ЭПО-7,5 (рисунок 3.3);

Рисунок 3.3. Электрический котёл Эван ЭПО-7,5.

2. Отопительный прибор (*16)*, в качестве которого использовались радиаторы: алюминиевый Polus 500 (рисунок 3.4), чугунный М140-500 (рисунок 3.5) и биметаллический Polus 500 (рисунок 3.6)

Рисунок 3.4. Радиатор алюминиевый Polus 500.

Рисунок 3.5. Радиатор чугунный М140-500.

Рисунок 3.6. Радиатор биметаллический Polus 500.

3. Регулируемый источник питания 2 Эван ЭПО для работы котла;
4. Циркуляционный насос (*8*) Ведуга 19 ЦВП-Т-2-9 (рисунок 3.7);

Рисунок 3.7. Циркуляционный насос Ведуга 19 ЦВП-Т-2-9.

5. Расходомер (*10)*, в качестве которого использовался счётчик воды БЕТАР СГВ-15 (рисунок 3.8);

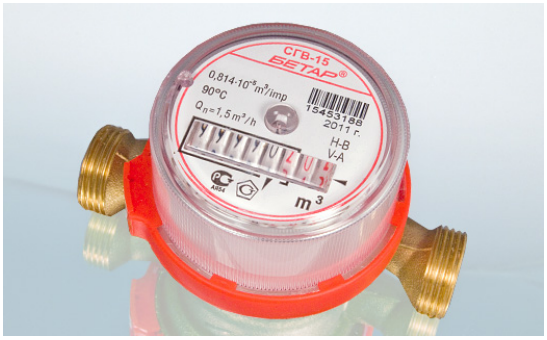


Рисунок 3.8. Счётчик воды БЕТАР СГВ-15.

6. Термометры (*3, 6)* технические жидкостные ТТЖ-М исп.1 (рисунок3.9);

Рисунок 3.9. Термометр ТТЖ-М исп.1

7. Манометры (*4, 7)* радиальные WATTS F+R201 (MRP) (рисунок 3.10);

Рисунок 3.10. Манометр WATTS F+R201.

8. Устройство измерения теплового потока и отображения информации ИТП-МГ4.03 «ПОТОК» (рисунок 3.11), состоящее из датчиков теплового потока (*13, 15, 17)*, датчиков температуры (*14, 18)* и блока вычисления (19);

Рисунок 3.11. ИТП - МГ4.03 «ПОТОК» с датчиками температуры и датчиками теплового потока.

9. Регуляторы расходы жидкости (*9, 11),* в качестве которого использовались краны шаровые d=15 мм;
10. Соединительные трубопроводы 1, 12, 20 – шланги в оплётке d=15 мм;

Температура и относительная влажность воздуха в помещении измерялись термогигрометром EXTECH MO297 (рисунок 3.12).

Рисунок 3.12. Термогигрометром EXTECH MO297.

Динамика объекта исследовалась по отношению к ступенчатому изменению напряжения (0-220В) на входе котла. Значение показаний прибора ИТП-МГ4.03 «ПОТОК», манометра WATTS F+R201, счётчика воды БЕТАР СГВ-15, давления наблюдались визуально и регистрировались с интервалом в 2 - 3 минуты и заносились в таблицы. Протоколы испытаний приборов представлены в приложении Г.

На рисунках 3.13 - 3.15 представлены результаты экспериментального исследования.

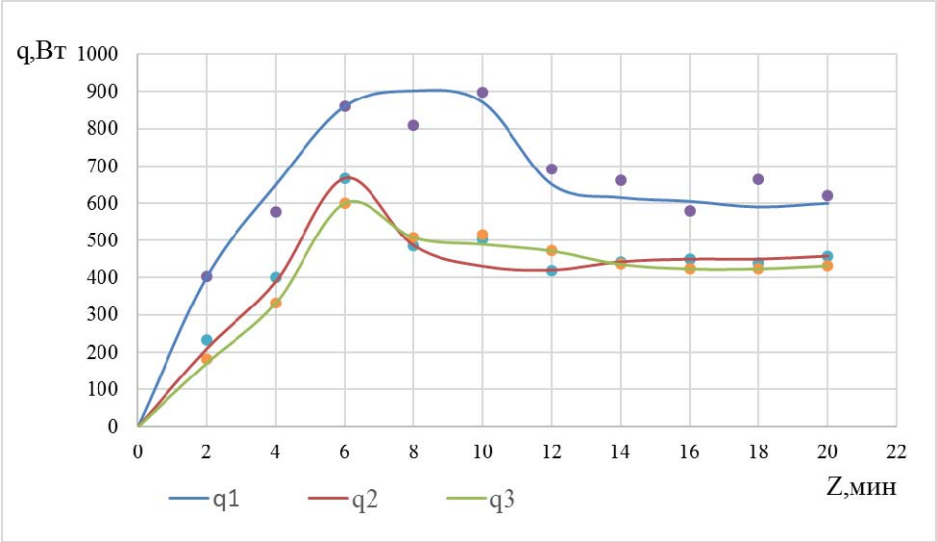


Рисунок 3.13. Зависимость теплового потока от времени, для алюминиевого радиатора.

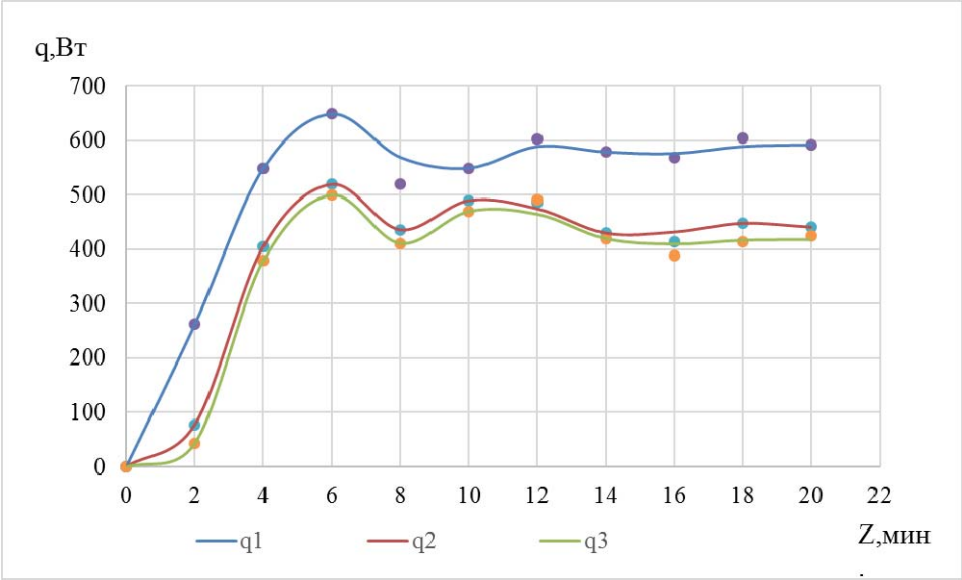


Рисунок 3.14. Зависимость теплового потока от времени, для биметаллического радиатора.

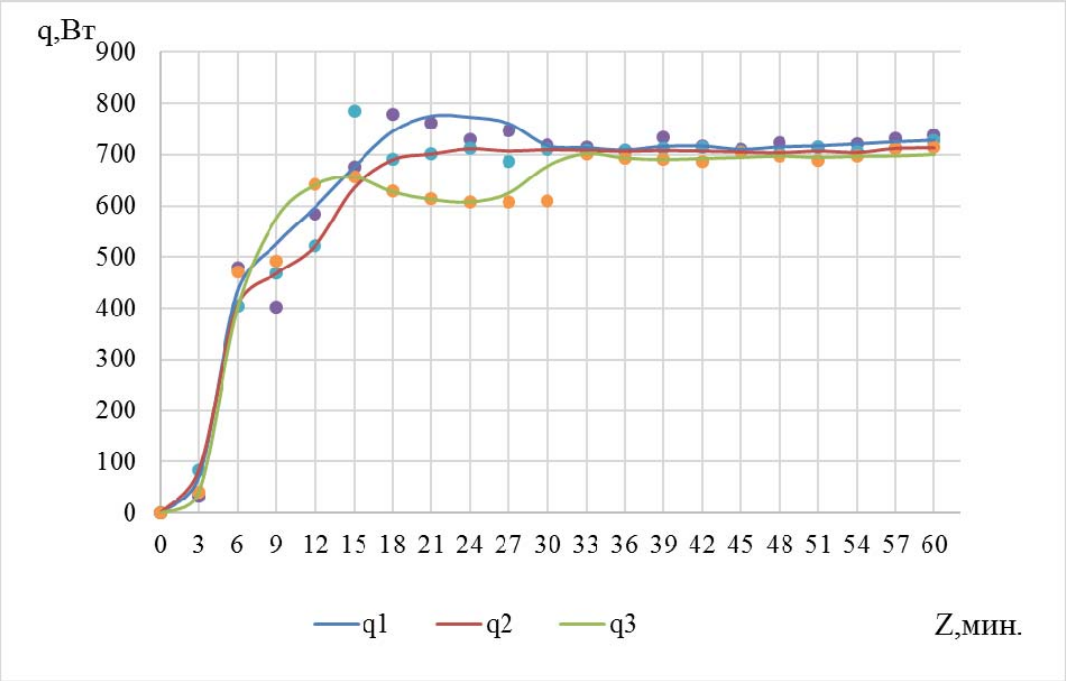


Рисунок 3.15. Зависимость теплового потока от времени, для чугунного радиатора.

По результатам экспериментальных исследований получили следующие данные по времени нагрева отопительных приборов: алюминиевый радиатор –12 мин, биметаллический – 14 мин, чугунный – 33 мин.

Анализируя данные по времени нагрева радиаторов можно сделать вывод о том, что имеется различие между экспериментальными и расчетными значениями. При этом максимальное расхождение наблюдается у чугунного радиатора. Поэтому рекомендуется ввести поправочный коэффициент β в формулу (3.11).

Итоговая формула имеет вид:

$$Z_н = 3 \cdot \beta \cdot \frac{m \cdot c}{\alpha \cdot F_{cm}} \text{ , с,} \qquad (3.13)$$

где β – поправочный коэффициент, учитывающий марку отопительного прибора.

Численные значения коэффициента β представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3. Значения поправочного коэффициента

Вид отопительного прибора	β
Алюминиевый	1,11
Биметаллический	0,78
Чугунный	0,65

3.4 Выводы по главе 3.

1.Разработан приближенный аналитический метод определения энергозатрат и времени нагрева отопительных приборов.

2.Проведена оценка времени нагрева различных отопительных приборов по результатам теоретического и экспериментального исследований. В расчетную формулу по определению времени нагрева отопительных приборов внесены поправочные коэффициенты, учитывающие особенности радиаторов.

3.В результате исследований получена зависимость теплового потока отопительных приборов от времени.

ГЛАВА 4. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ ТРУБОПРОВОДОВ СИСТЕМЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ЗДАНИЙ.

Для снижения тепловых потерь трубопроводами систем теплоснабжения зданий индивидуальной застройки необходимо использовать высокоэффективные теплоизоляционные материалы с низким коэффициентом водопоглащения. К таким материалам относятся пенополиуретановые скорлупы, применение которых в зданиях с прерывистым отоплением рассмотрено в работе [13]. Скорлупы из заливных пенополиуретанов изготавливаются в виде полуцилиндров. В виду относительно невысокой теплостойкости (80÷150℃) необходимо предусматривать защиту пенополиуретана от перегрева.

Коэффициент теплопроводности пенополиуретанов находится в диапазоне 0,02 до 0,04 $Вт/м\cdot{}^{0}C$, что является одним из самых низких показателем среди различных теплоизоляционных материалов.

4.1 Экспериментальное исследование коэффициента теплопроводности пенополиуретановых скорлуп.

Целью исследования являлось определение коэффициента теплопроводности пенополиуретана при различных температурах материала.

Определение коэффициента теплопроводности проводилось стационарным и зондовым методами в соответствии с ГОСТ 7076-99 [26].

На рисунке 4.1 представлен прибор ИТП-МГ4 «250» позволяющий определять коэффициент теплопроводности в диапазоне значений λ = 0,02÷1,5 Вт/(м·˚С) стационарным методом при средней температуре образца 15÷42,5℃ и зондовым методом в диапазоне значений λ = 0,03÷1,0 Вт/(м·˚С). Стационарный тепловой поток, направленный сверху в низ создается нагревателем, расположенным в верхней плите и холодильником – в нижней плите. С целью создания одномерного стационарного поля в исследуемом образце его толщина должна находиться в пределах от 5 до 50

мм. Для исследования теплопроводности тонкостенных штукатурок их наносят на стальные листы толщиной от 1 до 3 мм и определяют на установке эквивалентное значение коэффициента теплопроводности. Затем, измерив толщину стального листа и штукатурки, расчетным путем находят значение коэффициента теплопроводности штукатурного слоя. При использовании цилиндрического зонда, вводимого в исследуемый образец, создается в нем нестационарное температурное поле. Нагрев зонда осуществляется с помощью расположенного в нем электронагревателя.

Рисунок 4.1. Измеритель теплопроводности ИТП-МГ 4 «250»

Установка ИТП-МГ 4 «250» снабжена внешним прибором, в котором размещено вычислительное устройство. Прибор в автоматическом режиме определяет значение коэффициента исследуемого материала и заносит его в архив.

При вычислении используются следующие формулы для нахождения коэффициента теплопроводности λ и термического сопротивления R:

$$\lambda = \frac{H \cdot q}{T_{\text{н}} - T_x}, \text{ Вт/(м·°C);} \qquad (4.1)$$

$$R = \frac{T_{н} - T_{х}}{q} - 2 \cdot R_{к}, \text{ (м}^2 \cdot ^\circ\text{C)/Вт.} \qquad (4.2)$$

где $R_к$ – штатное термическое сопротивление, (м$^2\cdot$˚С)/Вт; H – толщина образца, м; $T_н$, $T_х$ – температуры нагретой и холодной поверхностей образца соответственно, ˚С.

Достоверность полученных экспериментальных результатов согласно [94] оценивалась по их воспроизводимости, полученной в пяти сериях опытов. Повторение опытов проводилось в одинаковых условиях.

Коэффициент вариации во всех случаях не превышал значения 5%, что свидетельствует о достоверности полученных результатов.

4.2 Результаты исследования коэффициента теплопроводности.

По вышеуказанной методике в аккредитованной теплотехнической лаборатории СамГТУ было выполнено исследование значений коэффициента теплопроводности пенополиуретана плотностью $\rho = 60 кг/м^3$ при средней температуре образца 20÷60˚С. Результаты исследований представлены в таблице 4.1 и на рисунке 4.2.

Таблица 4.1. Протокол испытаний.

№ п/п	λ, Вт/(м·°С)	Тх, °С	Тн, °С	ΔТ, °С	q, Вт/м²	R, (м²·°С)/Вт	$\overline{\lambda}$, Вт/(м·°С)	$\Delta\lambda_i$, Вт/(м·°С)	$\overline{\Delta\lambda}$, Вт/(м·°С)	σ, Вт/(м·°С)
1	0,0331	13,9	42,8	28,35	45,4	0,636	0,03318	-0,000080	0,000064	0,000084
	0,0333				45,3	0,636		0,000120		
	0,0332				45,4	0,636		0,000020		
	0,0332				45,2	0,636		0,000020		
	0,0331				45,4	0,636		-0,000080		
2	0,0322	15,2	35,2	25,2	30,6	0,656	0,03222	-0,000020	0,000064	0,000084
	0,0323				30,6	0,656		0,000080		
	0,0322				30,5	0,656		-0,000020		
	0,0321				30,6	0,656		-0,000120		
	0,0323				30,5	0,656		0,000080		
3	0,0331	15	50	32,5	55,5	0,636	0,0332	-0,000100	0,000080	0,000122
	0,0334				55,6	0,636		0,000200		
	0,0332				55,5	0,636		0,000000		
	0,0331				55,5	0,636		-0,000100		
	0,0332				55,5	0,636		0		
4	0,0313	15	25	20	15,7	0,636	0,03122	0,000080	0,000064	0,000084
	0,0312				15,7	0,636		-0,000020		
	0,0313				15,8	0,636		0,000080		
	0,0311				15,7	0,636		-0,000120		
	0,0312				15,8	0,636		-0,000020		
5	0,0348	20	55	37,5	57,16	0,656	0,03478	0,000020	0,000064	0,000084
	0,0347				57,18	0,656		-0,000080		
	0,0349				57,2	0,656		0,000120		
	0,0348				57,19	0,656		0,000020		
	0,0347				57,17	0,656		-0,000080		
6	0,0359	25	60	42,5	64,19	0,662	0,03582	0,000080	0,000064	0,000084
	0,0358				64,2	0,662		-0,000020		
	0,0357				64,18	0,662		-0,000120		
	0,0358				64,2	0,662		-0,000020		
	0,0359				64,19	0,662		0,000080		
7	0,0376			50			0,0376	0,000000	0,000040	0,000071
	0,0377							0,000100		
	0,0375							-0,000100		
	0,0376							0,000000		
	0,0376							0,000000		
8	0,0387			55			0,03866	0,000040	0,000048	0,000055
	0,0387							0,000040		
	0,0386							-0,000060		
	0,0387							0,000040		
	0,0386							-0,000060		
9	0,0398			60			0,03974	0,000060	0,000072	0,000089
	0,0397							-0,000040		
	0,0396							-0,000140		
	0,0398							0,000060		
	0,0398							0,000060		

Результаты исследования представлены в виде графика на рисунке 4.2.

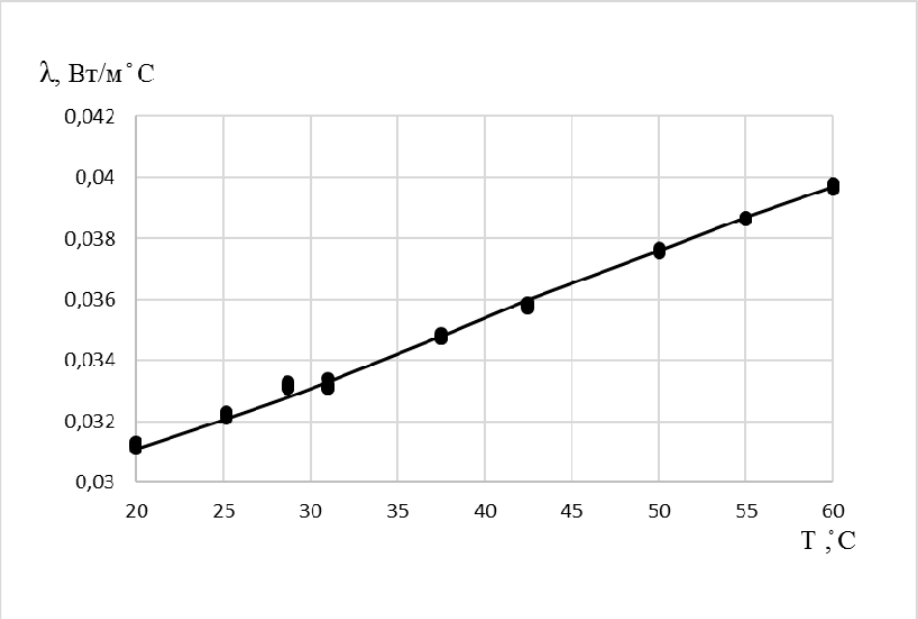


Рисунок 4.2. Зависимость теплопроводности пенополиуретана от температуры.

В результате обработки полученных экспериментальных значений получена формула для определения коэффициента теплопроводности λ, Вт/(м·˚С) пенополиуретана в зависимости от температуры материала.

$$\lambda = \lambda_{20} \cdot \left[1 + 0,0071 \cdot (T - 20\right] \qquad (4.11)$$

где λ_{20} - коэффициент теплопроводности материала при средней температуре его тела 20℃, Вт/(м·˚С); T - температура материала, ℃ .

4.3. Повышение теплозащитных характеристик пенополиуретановых скорлуп.

Для повышения срока эксплуатации и увеличения диапазона использования по температуре предложена конструкция скорлупы из пенополиуретана с использованием теплового экрана в виде алюминиевой фольги.

На рисунке 4.3 представлен процесс теплообмена в изолированном трубопроводе.

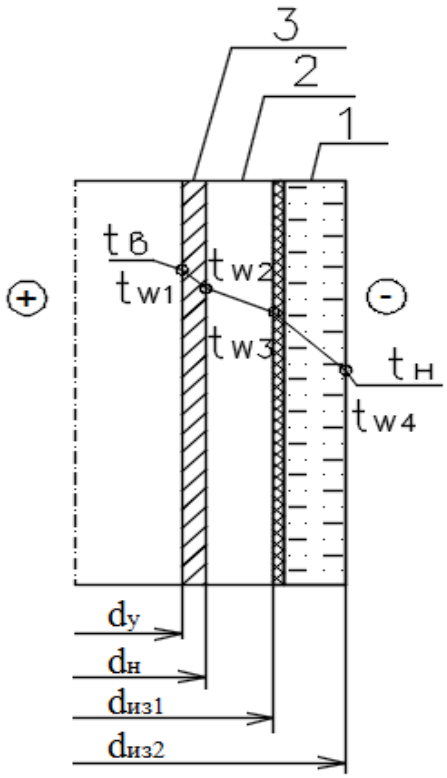


Рисунок 4.3. Процесс теплообмена в изолированном трубопроводе.

где 1 - скорлупа из пенополиуретана ($\lambda_1 = 0,034 Вт/м \cdot {}^0C$); 2 - воздушная прослойка; 3 - трубопровод системы теплоснабжения.

Выполним расчет по определению величины удельного теплового потока $q_l, Вт/м$, а также найдем распределение температур в характерных точках изолированного трубопровода, представленного на рисунке 4.3.

Подробный расчет представлен в работе [13].

На рисунке 4.4 представлен фрагмент изолированного трубопровода, для которого выполнялись вышеуказанные расчеты.

Рисунок 4.4. Автоматизированный тепловой узел жилого дома

Исходные данные: d_y=0,08 м; $d_н$=0,089 м; $d_{из1}$=0,115м; $d_{из2}$=0,175 м; $t_в$=60 °С; $t_н$=20 °С.

Результаты расчетов для двух вариантов исполнения представлены в таблице 4.2.

Для проверки точности предложенной методики расчета экранной изоляции был выполнен физический эксперимент по определению тепловых характеристик изолированного трубопровода, представленного на рисунке 4.4.

Для проведения эксперимента использовались следующие приборы: измеритель температуры CENTER 313, измеритель температуры CENTER 301, измеритель теплового потока ИТП.МГ4.03 «Поток» [13].

Результаты эксперимента представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2. Результаты исследования теплового состояния изолированного трубопровода.

№ п/п	Вид изоляции	Удельный тепловой поток $q_l, Вт/м$		Температура на внутренней поверхности скорлупы $t_{w3}, {}^0C$		Перепад температур между теплоносителем и внутренней поверхностью скорлупы $\Delta t, {}^0C$	
		расчет	экспери-мент	расчет	экспери-мент	расчет	экспери-мент
1	Воздушный зазор + алюминиевая фольга + пенополиуретан	11,45	11,0	44,4	44,0	15,6	16,0
2	Воздушный зазор + пенополиуретан	14,05	13,74	53,7	53,0	6,3	7,0

На основании результатов, представленных в таблице 4.2, можно сделать вывод: конструкция тепловой изоляции, состоящая из ППУ скорлупы с воздушной прослойкой, экранированной алюминиевой фольгой существенно снижает тепловые потери. Результаты экспериментальных данных не существенно отличаются от расчетных значений, что свидетельствует о достаточной точности предложенной методике расчета.

Далее выполним по вышеуказанной методике расчеты для различных вариантов утепления стальной трубы, проложенной на открытом воздухе.

Исходные данные для расчета: $t_н = -30^0C$; $t_в = 90^0C$; $z_{от} = 203$ суток; $d_н = 0,089 м$. Результаты расчета сведены в таблицу 4.3.

Согласно СП 61.13330.2012 [70] для трубопровода, расположенного на открытом воздухе, с условным проходом 80 мм и температурой теплоносителя 90˚С норма плотности теплового потока $q_l = 32,8 Вт/м$.

Таблица 4.3. Результаты расчета утепленного трубопровода.

№ п/п	Вид изоляции	Толщина Изоляции, $\delta, мм$	Толщина воздушного зазора $\delta_1, мм$	Удельный тепловой поток $q_{l,} Вт / м$
1	Минвата	80	-	32,2
2	ППУ	50	-	29,25
3	ППУ+воздушный зазор+алюминиевая фольга	30	13	32,6

Из данной таблице видно, что наименьшая толщина изоляции будет при применении пенополиуретановых скорлуп в сочетании с воздушной прослойкой и алюминиевой фольгой. Как известно, стоимость воздушной прослойки с алюминиевой фольгой относительно сырья для производства скорлуп несопоставима. Объем пенополиуретана на 1 п.м. трубы для конструкции №2 составляет V=0,0216 м³, для конструкции №3 V=0,014 м³.

При использовании в качестве конструкции тепловой изоляции варианта №3 происходит экономия пенополиуретана на 35% на 1.п.м. трубопровода относительно конструкции №2.

Как показали расчеты, конструкция тепловой изоляции из ППУ скорлуп с применением экрана является высокоэффективной тепловой изоляций для трубопроводов и позволяет существенно снизить тепловые потери.

На основании проведенных исследований получен патент на полезную модель №178409 «Теплоизоляционное изделие из пенополиуретана» [97]. На рисунке 4.5 представлена конструкция изобретения.

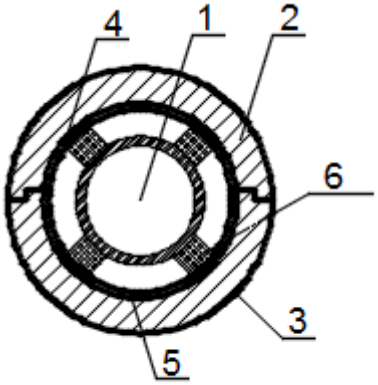


Рисунок 4.5. Конструкция тепловой изоляции.

Теплоизоляционное изделие из пенополиуретана включает в себя верхнюю (2) и нижнюю (3) скорлупы, соединенные между собой с помощью пазов и гребней. На внутреннюю часть верхней (2) и нижней (3) скорлуп смонтирована алюминиевая фольга (4) и (5). Так же в качестве закладных элементов используются керамические вставки (6) для обеспечения равномерного по толщине воздушного зазора между трубопроводом (1) и скорлупами (2) и (3).

Устройство работает следующим образом: на трубопровод (1) снизу прикладывается скорлупа (3), на которую в заводских условиях установлены алюминиевая фольга (5) и керамические вставки (6). Далее, аналогичным способом на трубопровод (1) монтируется скорлупа (2), с нанесенной алюминиевой фольгой (4) и керамическими вставками (6). Затем скорлупы (2) и (3) стягиваются крепежными элементами (бондажи, жгуты, ленты и т.д.).

Таким образом устройство способно обеспечить изоляцию трубопроводов с температурой теплоносителя до +150 ˚С.

Процесс охлаждения теплоносителя в изолированном трубопроводе при нарушении его циркуляции является нестационарным.

Время остывания теплоносителя при нарушении его циркуляции определялось по известной формуле:

$$Z_0 = \frac{2326}{K_n} \cdot R_l \cdot \left[\frac{T \cdot (v_m + 0,9 \cdot v_{cm})}{T - 2 \cdot t_н} - \frac{(10 \cdot v_m)}{t_н} \right], ч \qquad (4.21)$$

где K_n- коэффициент, учитывающий дополнительные потери тепла через опоры; R_l - сопротивление теплопередаче изолированного трубопровода, (м·ºС)/Вт; T - температура воды до остановки циркуляции, ˚С; $t_н$ - температура окружающей среды, ˚С; v_m- объем воды, отнесенный к 1 м трубы, м³; v_{cm} - объем стенки, отнесенный к 1 м трубы, м³.

На рисунке 4.6 представлен расчет времени остывания теплоносителя для указанной выше конструкции трубопровода при следующих исходных данных: $t_н = -30^0 C$, $T = 90^0 C$, наружный диаметр трубопровода $d_н = 0,089$м, толщина изоляции из ППУ-скорлуп $\delta = 0,03 м$, толщина воздушной прослойки $\delta_1 = 0 \div 0,02 м$ [87].

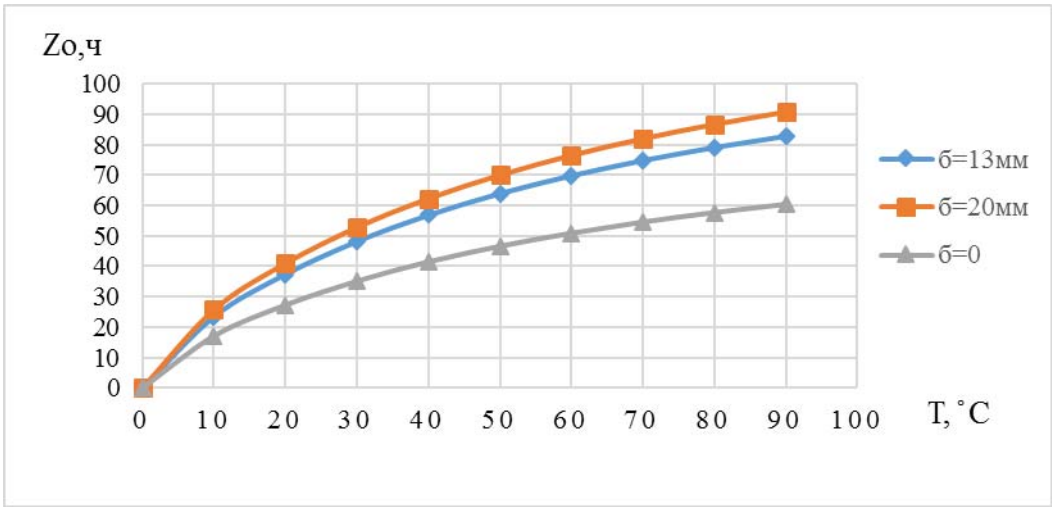


Рисунок 4.6. График зависимости времени остывания от температуры теплоносителя.

На основе результатов расчета, представленных на рисунке 4.6 видно, что с увеличением толщины воздушной прослойки увеличивается время остывания теплоносителя, необходимое для устранения аварийных ситуаций.

4.4 Выводы по главе 4.

1.Проведено экспериментальное исследование коэффициента теплопроводности заливочного пенополиуретана плотностью $\rho = 60 кг / м^3$ при средней температуре образца 20÷60℃.

2.Проведено теоретическое и экспериментальное исследование экранированной тепловой изоляции трубопроводов систем теплоснабжения.

3. Разработана высокоэффективная конструкция тепловой изоляции трубопроводов систем теплоснабжения с применение экранированных пенополиуретановых скорлуп, позволяющих за счет наличия воздушной прослойки снизить расход пенополиуретана на 35%.

4. Проведенные теоретические исследования процесса остывания изолированного трубопровода при нарушении циркуляции воды показали, что с увеличением толщины воздушной прослойки увеличивается время остывания теплоносителя до значений, достаточных для устранения аварийных ситуаций.

ГЛАВА 5. ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫБОРА СТРОИТЕЛЬНЫХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРЕРЫВИСТОГО ОТОПЛЕНИЯ.

5.1 Оптимизация конструктивных решений строительных ограждающих конструкций зданий, эксплуатируемых в условиях прерывистого отопления.

Выбор толщины слоя утепления определяется из санитарно-гигиенических и комфортных условий согласно СП 50.13330.2012 [69]. При этом должно выполняться следующее неравенство:

$$R_o^{пр} > R_o^{тр}, \tag{5.1}$$

где $R_o^{пр}, R_o^{тр.}$ - приведенное и требуемое сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции, соответственно, (м²·°С)/Вт.

Важным показателем для зданий с дежурным отоплением является показатель времени прогрева ограждающих конструкций, зависящий от теплотехнических характеристик отдельных слоев ограждений.

Исходя из вышесказанного логично дополнительно ввести условие для выбора ограждающих конструкций следующего вида:

$$\tau_н < \tau_{тр.}, \tag{5.2}$$

$\tau_н, \tau_{тр.}$ - фактическое и требуемое время нагрева ограждения, соответственно, с.

Исходя из выражения (5.1) неравенство для определения сопротивления теплопередаче глади однослойного ограждения, удовлетворяющее санитарно-гигиеническим и комфортным условиям выглядит следующим образом:

$$R_{0_1}^{усл.} \geq \frac{t_{в2} - t_н}{r \cdot \alpha_в \cdot \Delta t_н}, \text{ (м²·°С)/Вт,} \tag{5.3}$$

Исходя из формул (5.1), (5.2), (2.10), получим зависимость для определения требуемого сопротивления теплопередачи глади наружной стены следующего вида:

$$R_{0_2}^{усл.} \le \frac{\alpha_н - \alpha_в}{\alpha_в \cdot a_н} + \frac{\tau_{тр.} \cdot (t_{в2} - t_н)}{A \cdot c \cdot \rho \cdot \delta \cdot (t_{в2} - t_{в1})}, \text{ (м}^2\cdot^\circ\text{C)/Вт,} \quad (5.4)$$

$A = \frac{1 + 2 \cdot \varphi}{1 + \varphi}$ – безразмерный коэффициент.

Из уравнения (5.4) получим формулу для определения минимальной толщины наружной стены, обеспечивающей требуемое время нагрева:

$$\delta_{\max} = -\frac{\lambda}{\alpha_н} + \sqrt{\frac{\lambda^2}{\alpha_н^2} + \frac{\lambda \cdot \tau_{тр.}}{\rho \cdot c \cdot A} \cdot \frac{t_{в2} - t_н}{t_{в2} - t_{в1}}}, \text{ м.} \quad (5.5)$$

Минимальное значение толщины наружной стены находим из выражения:

$$R_{0_1}^{усл.} = \frac{1}{\alpha_н} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_в}, \text{ (м}^2\cdot^\circ\text{C)/Вт;} \quad (5.6)$$

$$\delta_1^{\min} = \frac{\left(R_{0_1}^{усл.} - \frac{1}{\alpha_в} - \frac{1}{\alpha_н} \right)}{\lambda}, \text{ м.} \quad (5.7)$$

В таблице 5.1 представлен результат расчета процесса нагрева однослойных наружных стен.

Таблица 5.1. Результат расчета процесса нагрева однослойных наружных стен.

Конструкция наружной стены	Минимальная толщина наружной стены	Максимальная толщина наружной стены при времени нагрева					
		4	8	16	24	32	40
Монолитный беспесчаный керамзитобетон: ρ=600 кг/м³, λ= 0,14 Вт/(м·°С), с=840 Дж/(кг·°С).	0,21	0,136	0,145	0,279	0,34	0,397	0,444
Деревянный брус: ρ=500 кг/м³, λ= 0,14 Вт/(м·°С), с=2300 Дж/(кг·℃).	0,21	0,088	0,127	0,182	0,225	0,261	0,292
Монолитный керамзитобетон: ρ= 600 кг/м³, λ=0,20 Вт/(м·°С), с=840 Дж/(кг·°С).	0,30	0,162	0,232	0,332	0,408	0,473	0,53
Монолитный пенобетон: ρ=600 кг/м³, λ=0,17 Вт/(м·°С), с=840 Дж/(кг·°С).	0,255	0,15	0,214	0,307	0,377	0,437	0,489

Для зданий индивидуальной застройки наряду с однослойными конструкциями широкое применение нашли ограждающие конструкции, состоящие из 2-х слоев. Далее на примере рассмотрим задачу по определению оптимальной толщины двухслойных наружных стен.

Рассмотрим конструкцию наружной стены, представленной на рисунок 5.1, здания коттеджа, утепленную снаружи плитами из базальтовой минваты .

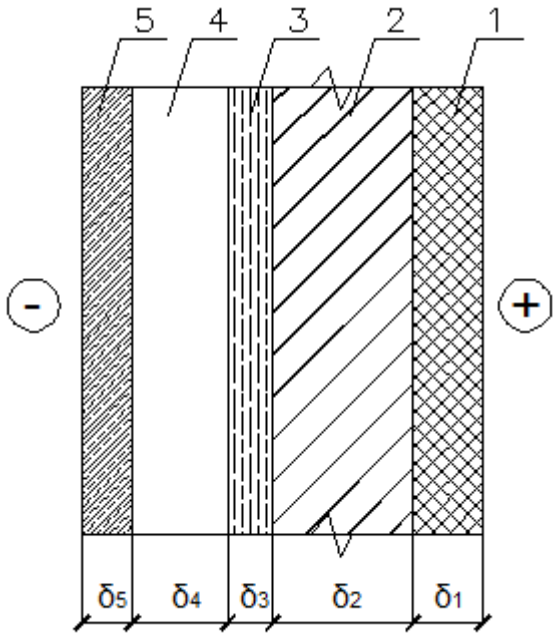


Рисунок 5.1. Конструкция наружной стены.

Наружная стена состоит из: 1– стеновой брус ($\delta_1 = 0{,}045м$); 2–плиты из базальтовой минваты (δ_2 – по расчету); 3–ветрозащитная мембрана ($\delta_3 = 0{,}005м$); 4–вентилируемая воздушная прослойка ($\delta_4 = 0{,}05м$); 5–пластиковый сайдинг ($\delta_5 = 0{,}005м$).

Требуемая минимальная толщина утеплителя согласно СП 50.13330.2012 [69] определяется исходя из соблюдения санитарно–гигиенических и комфортных условий по формуле (5.8)

$$R_o^{\min} > R_{o1}^{mp}, \qquad (5.8)$$

где $R_o^{\min}$ - минимальное значение приведенного сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции, (м²·°С)/Вт; R_{o1}^{mp} - требуемое значение приведенного сопротивления теплопередаче, исходя из обеспечения санитарно - гигиенических и комфортных условий, (м²·°С)/Вт [11].

Из неравенства (5.8) получим выражение для определения минимального значения толщины слоя утеплителя следующего вида:

$$(\delta_2)_{\min} \geq \lambda_2 \cdot \left(\frac{t_{в2} - t_н}{\alpha_в \cdot \Delta t_н \cdot r} - \frac{1}{\alpha_в} - \frac{\delta_1}{\lambda_1} - \frac{\delta_3}{\lambda_3} - \frac{1}{\alpha_н} \right), \qquad (5.9)$$

Ввиду малости значения термического сопротивления теплопередаче ветрозащитной мембраны им можно пренебречь.

Запишем аналитическое решение для нахождения $R_{O_{\max}}^{усл}$ относительно требуемого значения времени нагрева ограждающей конструкции, определяемого по формуле (2.10)

$$\left\{\begin{array}{l}\left(R_{O_{\max}}^{усл}\right)^2+R_{O_{\max}}^{усл}\cdot\left(\dfrac{2\cdot c_1\cdot\rho_1\cdot\delta_1}{c_2\cdot\rho_2\cdot\lambda_2}-\dfrac{2}{\alpha_в}-\dfrac{2\cdot\delta_1}{\lambda_1}\right)-\dfrac{c_1\cdot\rho_1\cdot\delta_1}{c_2\cdot\rho_2\cdot\lambda_2}\cdot\left(\dfrac{2}{\alpha_в}+\dfrac{\delta_1}{\lambda_1}\right)+\\ +\left(\dfrac{1}{\alpha_в}+\dfrac{\delta_1}{\lambda_1}+\dfrac{1}{\alpha_н}\right)\cdot\left(\dfrac{1}{\alpha_в}-\dfrac{1}{\alpha_н}+\dfrac{\delta_1}{\lambda_1}\right)-\dfrac{\tau_н\cdot\left(t_{в2}-t_н\right)}{A\cdot\left(t_{в2}-t_{в1}\right)\cdot c_2\cdot\rho_2\cdot\lambda_2}=0\end{array}\right\}. \qquad (5.10)$$

В результате решения алгебраического уравнения (5.10) получим выражение для определения максимально допустимого значения сопротивления теплопередаче глади наружной стены, обеспечивающего необходимое время ее нагрева

$$R_{O_{\max}}^{усл}=\frac{\delta_1}{\lambda_1}+\frac{1}{\alpha_в}-\frac{c_1\cdot\rho_1\cdot\delta_1}{c_2\cdot\rho_2\cdot\lambda_2}+\sqrt{\left(\frac{\delta_1}{\lambda_1}+\frac{1}{\alpha_в}-\frac{c_1\cdot\rho_1\cdot\delta_1}{c_2\cdot\rho_2\cdot\lambda_2}\right)^2+B}\text{ ,(м}^2\cdot^\circ\text{C)/Вт}, \qquad (5.11)$$

$$B=\frac{c_1\cdot\rho_1\cdot\delta_1}{c_2\cdot\rho_2\cdot\lambda_2}\cdot\left(\frac{2}{\alpha_в}+\frac{\delta_1}{\lambda_1}\right)-\left(\frac{1}{\alpha_в}+\frac{\delta_1}{\lambda_1}+\frac{1}{\alpha_н}\right)\cdot\left(\frac{1}{\alpha_в}-\frac{1}{\alpha_н}+\frac{\delta_1}{\lambda_1}\right)+\frac{\tau_н\cdot\left(t_{в2}-t_н\right)}{A\cdot\left(t_{в2}-t_{в1}\right)\cdot c_2\cdot\rho_2\cdot\lambda_2}. \qquad (5.12)$$

По значению величины $R_{O_{\max}}^{усл}$ находим максимально допустимое значение толщины теплоизоляционного материала по формуле

$$(\delta_2)_{\max}=\lambda_2\cdot\left(R_{O_{\max}}^{усл}-\frac{1}{\alpha_в}-\frac{\delta_1}{\lambda_1}-\frac{1}{\alpha_н}\right)\text{,м}. \qquad (5.13)$$

В качестве примера выполним теплотехнический расчет наружной стены, конструкция которой приведена на рисунке 5.1.

В качестве исходных данных для расчета были приняты следующие значения: температура наружного воздуха $t_н=-30^0C$; температура внутреннего воздуха при дежурном отоплении $t_{в1}=12^0C$; на расчетном режиме $t_{в2}=22^0C$; теплофизические характеристики деревянного бруса и базальтовой минплиты $c_1=2300$ Дж/кг·°С, $\rho_1=500$ кг/м³, $\lambda_1=0{,}14$ Вт/(м·°С), $c_2=840$ Дж/кг·°С, $\rho_2=80$ кг/м³, $\lambda_1=0{,}042$ Вт/(м·°С); коэффициент

теплотехнической однородности наружной стены $r = 0{,}8$; $\alpha_в = 8{,}7$ Вт/(м²·°С), $\alpha_н = 12$ Вт/(м²·°С).

Результаты расчета требуемой толщины теплоизоляции представлены в таблице 5.2.

Таблица 5.2. Результаты теплотехнического расчета наружной стены жилого здания.

$\tau_н$,час	R_o^{min}, (м²·°С)/Вт	δ_2^{min},м	$R_{O_{max}}^{усл}$, (м²·°С)/Вт	δ_2^{maa},м
10	1,49	0,057	1,57	0,061
11			1,70	0,0676
12			1,83	0,0743
13			1,95	0,0807
14			2,08	0,0874
15			2,21	0,094
16			2,33	0,100

На рисунке 5.2 представлен результат расчета в графическом виде.

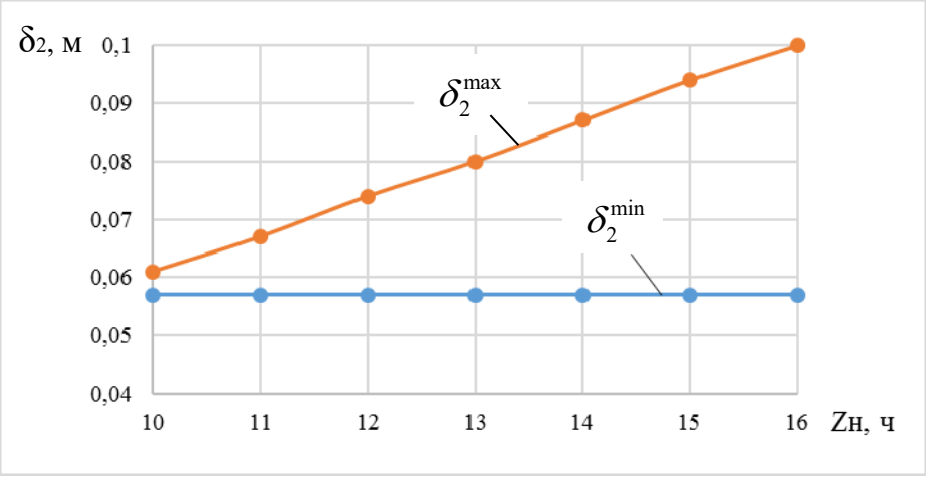


Рисунок 5.2. Зависимость толщины базальтовой минваты от времени нагрева наружной стены.

Из рисунка 5.2 наглядно видно, что выбор толщины слоя теплоизоляции непосредственно связан со временем нагрева наружного

ограждения, величина которого во многом зависит от способа управления работой индивидуального теплогенератора, установленного в коттедже.

5.2 Технико-экономическое обоснование применения прерывистого отопления.

Использование прерывистого отопления направлено на снижение энергозатрат при эксплуатации зданий. Принцип работы прерывистого отопления подробно изложен в главе 2. Вопросы экономики в системах ТГВ подробно рассмотрены в работе [34].

На рисунке 5.3 показан график изменения температуры внутреннего воздуха в здании при прерывистом отоплении.

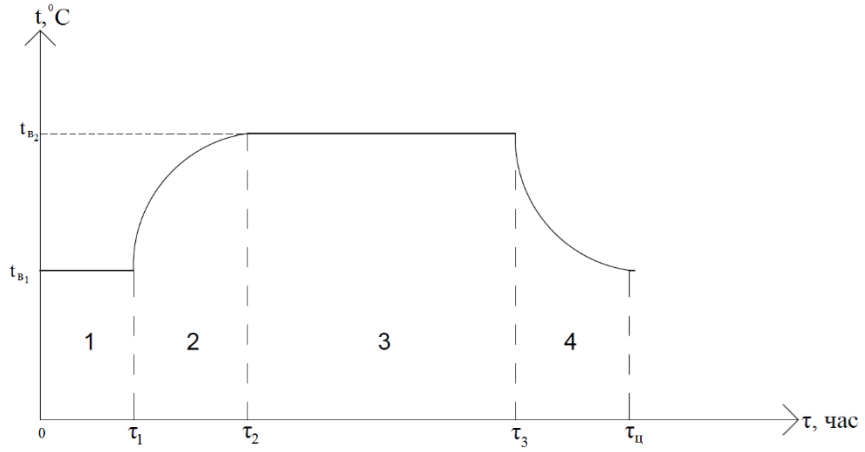


Рисунок 5.3. Изменение температуры внутреннего воздуха при прерывистом отоплении.

На рисунке 5.3 показаны четыре характерных стадии эксплуатации здания. На первой стадии ($0 < C < \tau_1$) используется дежурный режим отопления с температурой внутреннего воздуха $t_{в1} = 12^0$C. На второй стадии осуществляется натоп помещения до расчетной температуры внутреннего воздуха равной $t_{в2} = 22^0$C. Третья стадия характеризуется стационарным расчетным тепловым режимом при наличии в помещении людей. На четвертой стадии отопительный котел не работает и происходит охлаждение внутреннего воздуха до температуры $t_{в1} = 12^0$C. Для эксплуатации здания в

вышеуказанном цикле рекомендуется использовать систему автоматического управления отоплением. Система автоматического управления отоплением – это автоматизированная система управления устройствами, отвечающими за управление и регулирование отопления в помещениях коттеджа.

Использование САУ является целесообразным в переходный и зимний периоды года. При отсутствии человека в помещениях поддерживается дежурное отопление, которое препятствует вымораживанию системы и выпадению конденсата на внутренних поверхностях ограждающих конструкций. При необходимости система может быть переведена с дежурного режима на стационарный режим. Перевод режима может быть осуществлен как вручную, так и дистанционно с помощью GSM вязи.

Заданная температура внутри помещений создается и поддерживается с помощью водяных радиаторов системы отопления. Для системы отопления используется закрытая схема.

В газовом котле используется встроенная газовая горелка с функцией регулирования мощности. Регулирование происходит путем изменения расхода газа ($G_Г$) в газовой горелке при помощи широтно-импульсного модулятора.

На рисунке 5.4. представлена основная схема отопления коттеджа. Главным возмущающим воздействием является - температура внутреннего воздуха ($T_В$). Сигнал с внутренних датчиков посылается через преобразователь в центральный пункт САУ. Данные поступают на блок сравнения (БС), где полученный сигнал сравнивается с заранее установленными параметрами. В случае отклонения параметров внутреннего воздуха от заданных происходит регулирование с помощью электромагнитного клапана (ЭМК), установленного на газовой горелке.

Исходя из параметров отклонения происходит включение или отключение газовой горелки.

Из газового котла (ГК) в радиаторы поступает водяной теплоноситель с температурой $Т_П$. Тепло от радиаторов передается в помещение, где показатели температуры фиксируются внутренними датчиками.

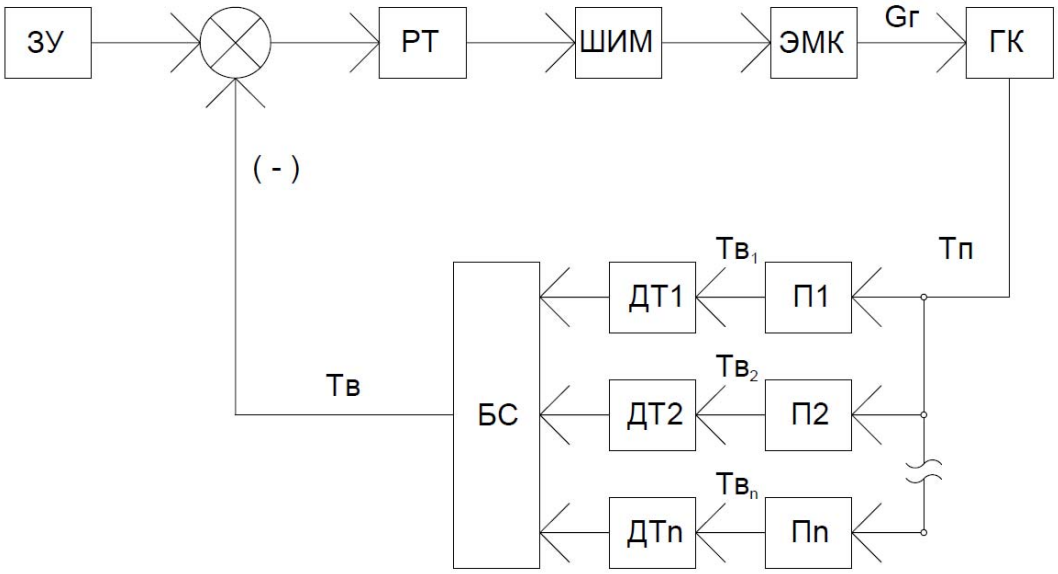


Рис. 5.4. Основная схема отопления коттеджа.

Управление тепловым режимом сводится к поддержанию его на заданном уровне или изменению в соответствии с заданным законом. Комфортные условия внутри помещения создаются путем конвективного и лучистого теплообмена между радиатором и внутренним воздухом.

Регулирование происходит с помощью изменения расхода газа (Gr) на газовой горелке. Периодичность включения и выключения газовой горелки позволяет уменьшить расход газа. Нагрев теплоносителя происходит в газовом котле, который далее с температурой Тп поступает в радиаторы отопления, установленные в помещениях. Показания датчиков внутреннего воздуха пересылаются через преобразователь на блок сравнения (БС), где полученные данные сравниваются с исходными заданными параметрами.

Исходным параметром является фиксированная температура внутреннего воздуха (Тв) с допустимым диапазон отклонения от него. В блоке сравнения сравниваются показания со всех датчиков внутреннего воздуха и выбирается наименьшее значение, которое далее пересылается на

задающее устройство, где происходит его сравнение с исходными параметрами. После сравнения задающее устройство посылает сигнал на широтно-импульсный модулятор, с помощью которого происходит регулирование электромагнитного клапана на газовой горелке.

Для управления и настройки дома из удаленных мест предлагается использовать GSM систему, которая связывает с помощью интернета и сотовой связи владельца и устройство управления.

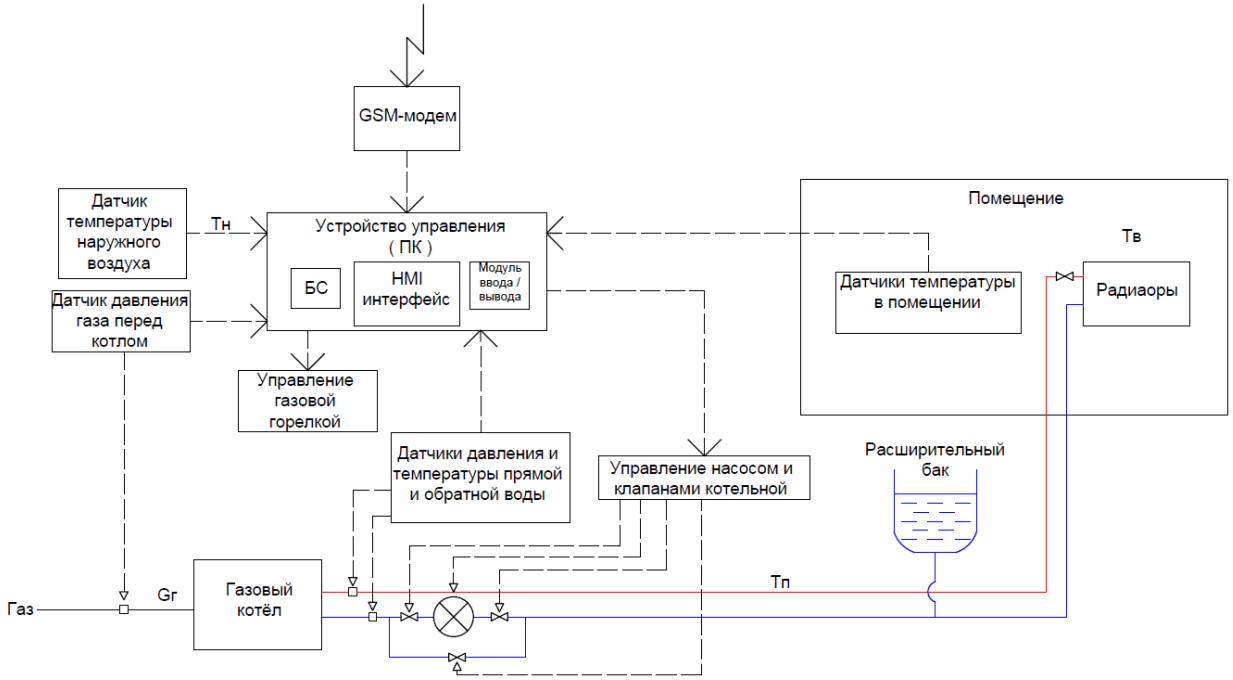


Рис.5.5. Схема автоматизации закрытой системы отопления коттеджа.

Исходным параметром в алгоритме управления является температура внутреннего воздуха. Система отопления работает в двух режимах: дежурном и номинальном (рис.5.6). При работе в дежурном режиме температура внутреннего воздуха поддерживается в пределах $Тв \geq 12^0C$. При понижении температуры внутри помещения включается система нагрева и происходит нагрев помещения. Датчик фиксирует изменение температуры и при достижении условия $Тв \geq 12^0C$ происходит отключение системы отопления.

При необходимости система может быть переведена с дежурного режима на номинальный. Основной критерий номинального режима

заключается в поддержании комфортной температуры внутреннего воздуха в диапазоне $18^0C < Тв \leq 26^0C$. При понижении температуры ниже 18^0C происходит включение системы нагрева и происходит натоп помещения до 26^0C. Далее система нагрева отключается и происходит постепенное остывание помещения до минимального порога. При его достижении происходит включение системы нагрева.

При отсутствии необходимости в дальнейшем поддержании номинальной температуры в помещении, система может быть переведена на дежурный режим.

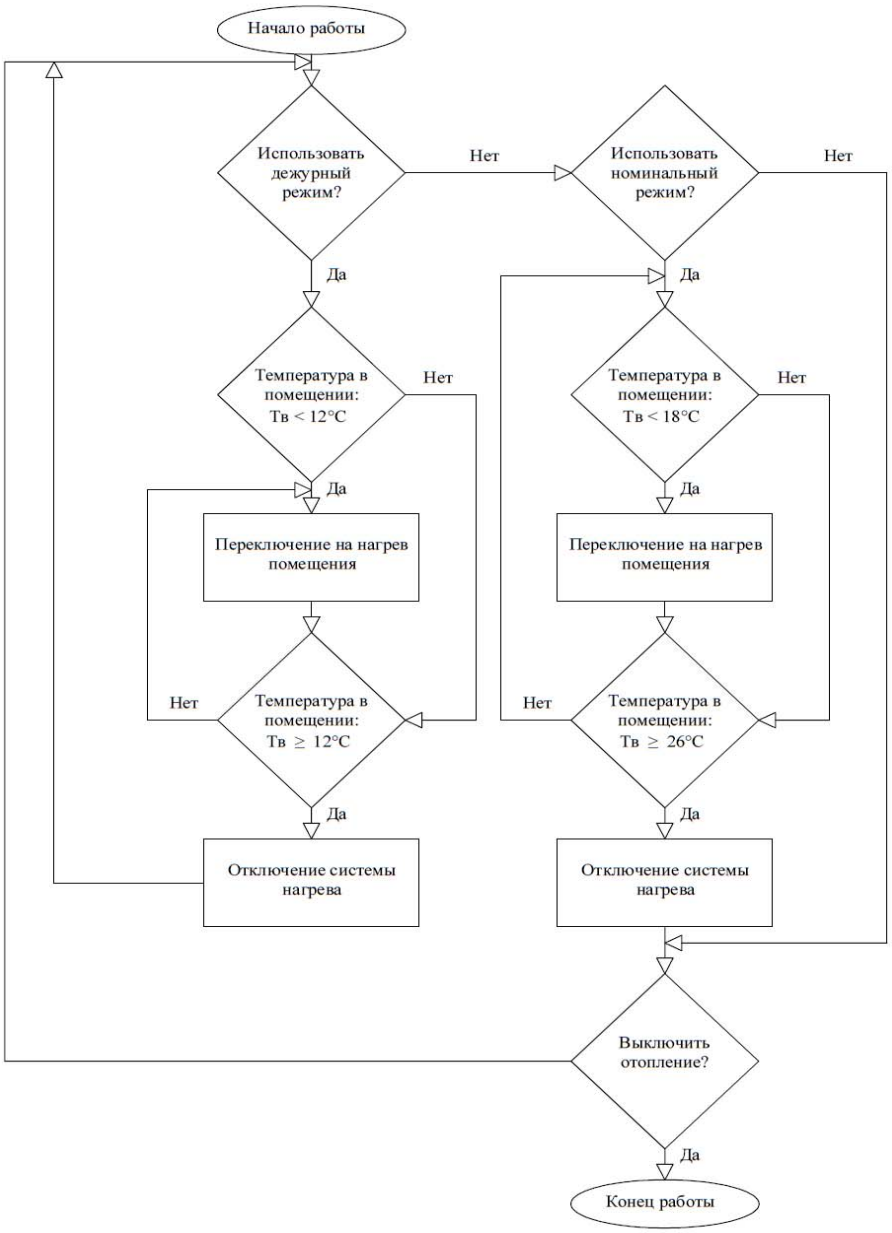


Рис.5.6. Алгоритм работы системы отопления коттеджа.

Предположим, что коттедж эксплуатируется лишь в выходные дни.

Следовательно, описанный выше цикл составляет $\tau_ц$ = 168 ч. Для сравнения представим температурный график при стационарной работе системы отопления (рисунок 5.7).

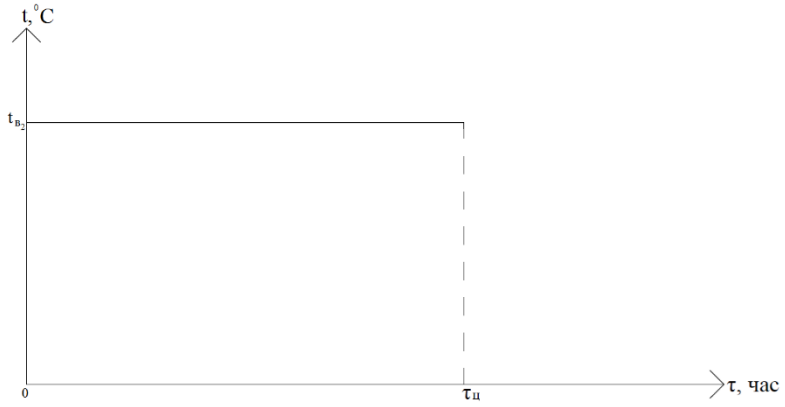


Рисунок 5.7. Температурный график при стационарной работе системы отопления.

Для оценки экономического эффекта использование прерывистого отопления произведем оценку энергозатрат для приведенных выше двух вариантов эксплуатации здания. Ниже представлены исходные данные для расчета. Чертеж жилого дома, для которого выполнялся расчет представлен в приложении Б.

Исходные данные:

- Площадь наружных стен - 99 м²;
- Площадь оконных конструкций – 8,4 м²;
- Площадь внутренних перегородок – 75,6 м²;
- Площадь пола – 79,37 м²;
- Площадь перекрытия чердачного – 79,37 м².

На рисунке 5.8 представлена конструкция наружной стены коттеджа.

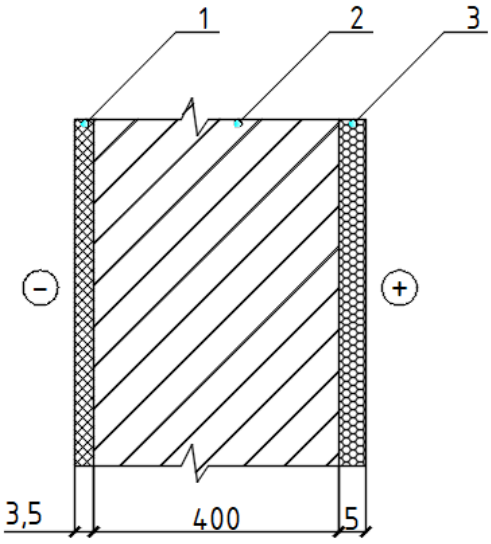


Рисунок 5.8. Конструкция наружной стены.

1- фактурный слой фасадной системы растворе (ρ_1=1800 кг/м^3; λ_1=0,70 Вт/(м·ºС); c_1=0,84 кДж/кг·ºС); 2- кладка из газобетонных камней на клеевом растворе (ρ_2=600 кг/м^3; λ_2=0,17Вт/(м·ºС); c_2=0,84 кДж/кг·ºС); 3- гипсовый раствор (ρ_3=800 кг/м^3; λ_3=0,30Вт/(м·ºС); c_3=0,84 кДж/кг·ºС).

Приведенное сопротивление теплопередаче наружной стены $R_o^{np} = 2{,}34$ (м²· ^{0}С)/Вт (расчет представлен в приложении Б).

На рисунке 5.6 представлена конструкция внутренних стен

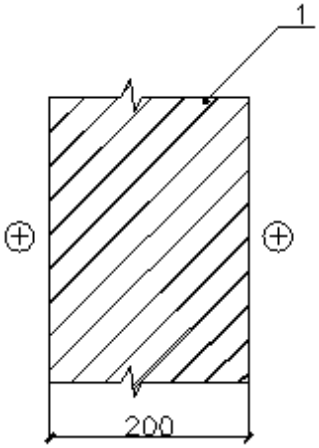


Рисунок 5.9. Конструкция внутренней стены.

1- Кладка из газобетонных камней на клеевом растворе (ρ_1=600 кг/м^3; λ_1=0,17Вт/(м·ºС); c_1=0,84 (кДж/кг·ºС); сопротивление теплопередачи глади наружной стены R_0=1,48 (м²· ^{0}С)/Вт.

Ђ)На рисунке 5.10 представлена конструкция перекрытия над

На рисунке 5.10 представлена конструкция перекрытия над неотапливаемым подвалом.

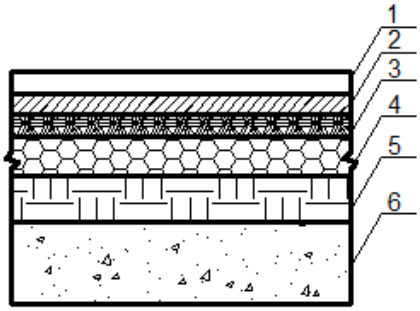


Рисунок 5.10. Конструкция перекрытия над неотапливаемым подвалом.

Таблица 5.3. Конструкция перекрытия над неотапливаемым подвалом.

№ слоя	Материал слоя	Толщина, δi, м	Плотность ρi, кг/м³	Теплоемкость ci, кДж/кг·°С	Коэффициент теплопроводности λi, Вт/м·°С
1	линолеум	0,0015	1000	1,47	0,33
2	подоснова	0,002	150	1,8	0,047
3	битумная мастика	0,001	1000	1,68	0,17
4	монолитный пенобетон	0,03	400	0,84	0,14
5	пеноплекс	0,04	30	1,34	0,03
6	ж/б плита перекрытия	0,12	2400	0,84	1,74

Сопротивление теплопередачи перекрытия составляет $R_0^{усл.}$=1,94 (м²· ^{0}С)/Вт.

На рисунке 5.11 представлена конструкция перекрытия над неотапливаемым чердаком.

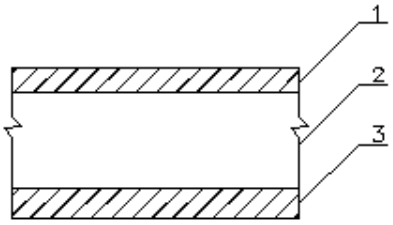


Рисунок 5.11. Конструкция перекрытия над неотапливаемым чердаком.

Таблица 5.4. Конструкция перекрытия над неотапливаемым чердаком.

№ слоя	Материал слоя	Толщина, δ_i, м	Плотность ρ_i, кг/м³	Теплоемкость c_i, кДж/кг·°С	Коэффициент теплопроводности λ_i, Вт/м·°С
1	Древесина, сосна	0,04	500	2,3	0,18
2	Минвата	0,2	50	0,84	0,04
3	Древесина, сосна	0,04	500	2,3	0,18

Сопротивление теплопередачи перекрытия составляет R_0=5,64 (м²· ^{0}С)/Вт.

В качестве оконных конструкций принят двухкамерный стеклопакет

Таблица 5.5. Конструкция стеклопакета.

№ слоя	Материал слоя	Толщина, δ_i, м	Плотность ρ_i, кг/м³	Теплоемкость c_i, кДж/кг·°С	Коэффициент теплопроводности λ_i, Вт/м·°С
1	стекло	0,03	2470	0,67	0,07

Тепловой баланс помещения при использовании прерывистого отопления описывается следующим уравнением:

$$\sum Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4, \text{ кДж/м}^2, \qquad (5.14)$$

где Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 – количество тепла, затрачиваемое на нагрев помещения на различных стадиях эксплуатации здания.

Количество тепла на четвертой стадии будет равно нулю, так как в помещение происходит остывание внутреннего воздуха.

Подведенное количество тепла на второй стадии рассчитывается по формуле ().

Тогда уравнение (5.14) примет вид:

$$\sum Q = Q_1 + Q_2 + Q_3, \text{ кДж/м}^2, \quad (5.15)$$

$$Q_1 = q_1 \cdot \tau_1, \text{ кДж/м}^2, \quad (5.16)$$

$$Q_3 = q_2 \cdot \tau_3, \text{ кДж/м}^2, \quad (5.17)$$

где q_1 и q_2 – удельная тепловая мощность отопления при $t_{в1}$ и $t_{в2}$, Вт/м^2; τ_1 и τ_3 – время работы цикла системы отопления на участках 1 и 3, с.

$$q_1 = \frac{t_{в1} - t_н}{R_0^{усл}}, \text{ Вт/м}^2. \quad (5.18)$$

$$q_2 = \frac{t_{в2} - t_н}{R_0^{усл}}, \text{ Вт/м}^2, \quad (5.19)$$

где $t_н$ – температура наружного воздуха, ^{0}С; $R_0^{усл}$ – сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции, (м$^2\cdot{}^0$С)/Вт.

Расчет по формуле (3.18) выполнялся для всех ограждающих конструкций коттеджа.

Продолжительность цикла, представленного на рисунке 5.3 составляет $\tau_ц$ = 168 ч, то есть 7 дней. Время работы системы отопления на стадиях τ_1=92 ч и τ_3 = 48 ч.

Для наружных стен:

$$q_1 = \frac{12+30}{2{,}34} = 15{,}8 Вт/м^2; \quad (5.20)$$

$$q_2 = \frac{22+30}{2{,}34} = 19{,}6 Вт/м^2; \quad (5.21)$$

$$\sum Q = \frac{(15,8 \cdot 92 \cdot 3600 + 978,2 \cdot 1000 + 19,6 \cdot 48 \cdot 3600)}{1000} = 9597,8 кДж / м^2 . \quad (5.22)$$

Для окна:

$$q_1 = \frac{12+30}{0,6} = 84 Вт / м^2 ; \quad (5.23)$$

$$q_2 = \frac{22+30}{0,6} = 104 Вт / м^2 ; \quad (5.24)$$

$$\sum Q = \frac{(84 \cdot 92 \cdot 3600 + 215 \cdot 1000 + 104 \cdot 48 \cdot 3600)}{1000} = 46007 кДж / м^2 . \quad (5.25)$$

Для перекрытия над неотапливаемым подвалом:

$$q_1 = \frac{12-2,9}{1,94} = 4,69 Вт / м^2 ; \quad (5.26)$$

$$q_2 = \frac{22-71}{1,94} = 7,68 Вт / м^2 ; \quad (5.27)$$

$$\sum Q = \frac{(4,69 \cdot 92 \cdot 3600 + 1297,4 \cdot 1000 + 7,68 \cdot 48 \cdot 3600)}{1000} = 4177,83 кДж / м^2 . \quad (5.28)$$

Для перекрытия над неотапливаемым чердаком:

$$q_1 = \frac{12+30}{5,64} = 7,44 Вт / м^2 ; \quad (5.30)$$

$$q_2 = \frac{22+30}{5,64} = 9,4 Вт / м^2 ; \quad (5.31)$$

$$\sum Q = \frac{(7,44 \cdot 92 \cdot 3600 + 499,2 \cdot 1000 + 9,21 \cdot 48 \cdot 3600)}{1000} = 4554,81 кДж / м^2 . \quad (5.32)$$

Произведем оценку энергозатрат тепловой энергии при стационарной работе системы отопления.

Уравнение (5.14) примет

$$\Sigma Q = q_2 \cdot \tau_ц , \text{ кДж/м}^2. \quad (5.33)$$

Для наружных стен:

$$\Sigma Q = 19{,}6 \cdot 168 \cdot 3600 = 11854{,}1 кДж/м^2. \quad (5.34)$$

Для окон:

$$\Sigma Q = 104 \cdot 168 \cdot 3600 = 62899{,}2 кДж/м^2. \quad (5.35)$$

Для перекрытия над неотапливаемым подвалом:

$$\Sigma Q = 7{,}68 \cdot 168 \cdot 3600 = 4644{,}86 кДж/м^2. \quad (5.36)$$

Для перекрытия над неотапливаемым чердаком:

$$\Sigma Q = 9{,}21 \cdot 168 \cdot 3600 = 5570{,}21 кДж/м^2. \quad (5.37)$$

Произведем оценку энергозатрат на отопление коттеджа за отопительный сезон.

Отопительный сезон для Самарской области составляет $Z_{о.п.}$ = 203 сут., т.е. 29 недель.

Общее количество тепла, затрачиваемое на эксплуатацию зданий в отопительный период, составляет:

$$Q = \sum Q \cdot 29 \cdot S, \text{кДж}; \quad (5.38)$$

S - площадь ограждающих конструкций, м2.

Определим общее количество тепла, затраченное на эксплуатацию здания в отопительный период, при прерывистой системе отопления:

Для наружных стен:

$$Q = 9597{,}8 \cdot 29 \cdot 99 = 27555283{,}8 кДж. \quad (5.39)$$

Для окон:

$$Q = 46007 \cdot 29 \cdot 8{,}4 = 11207305{,}2 кДж. \quad (5.40)$$

Для перекрытия над неотапливаемым подвалом;

$$Q = 4177{,}83 \cdot 29 \cdot 79{,}37 = 9616236{,}65 кДж. \quad (5.41)$$

Для перекрытия над неотапливаемым чердаком:

$$Q = 4554{,}81 \cdot 29 \cdot 79{,}37 = 10483942{,}82 кДж. \quad (5.42)$$

Для внутренних перегородок:

$$Q = 1008 \cdot 29 \cdot 75{,}6 = 2209939{,}2 кДж. \quad (5.43)$$

Определим общее количество тепла, затраченное на эксплуатацию здания в отопительный период, при стационарной работе системе отопления.

Для наружных стен:

$$Q = 11854,1 \cdot 29 \cdot 99 = 34033121,1 кДж. \quad (5.44)$$

Для окон:

$$Q = 6289,2 \cdot 29 \cdot 8,4 = 15322245,12 кДж. \quad (5.45)$$

Для перекрытия над неотапливаемым подвалом:

$$Q = 4644,86 \cdot 29 \cdot 79,37 = 10691213,61 кДж. \quad (5.46)$$

Для перекрытия над неотапливаемым чердаком:

$$Q = 5570,2 \cdot 29 \cdot 79,37 = 12821114,86 кДж. \quad (5.47)$$

Для внутренних перегородок:

$$Q = 0 кДж. \quad (5.48)$$

Количество тепла, расходуемое на нагрев инфильтрирующего воздуха при прерывистом отоплении, рассчитывается по формуле:

$$Q_{инф} = Q_{инф1} \cdot \tau_3 + Q_{инф2} \cdot \tau_2 + Q_{инф3} \cdot \tau_3, \text{ кДж}, \quad (5.49)$$

где $Q_{инф1}$, $Q_{инф2}$,$Q_{инф3}$ – расход тепла на нагрев инфильтрационного воздуха при L=3 м^3/ч и L=3/4 м^3/ч.

$$Q_{инф} = 0,28 \cdot L \cdot c \cdot \rho \cdot (t_{в2} - t_{о.п.}) \cdot F_п, \text{ Вт}, \quad (5.50)$$

где L – удельный расход удаляемого воздуха, м^3/ч; с – теплоемкость воздуха, кДж/кг^{0}С; ρ – плотность внутреннего воздуха, кг/м^3;

$t_{о.п.}$ – среднегодовая температура внутреннего воздуха, ^{0}С; Fп – площадь пола, м^2.

$$Q_{инф1} = 0,28 \cdot 0,75 \cdot 1 \cdot 1,39 \cdot (12 + 5,2) \cdot 79,37 = 398,5 \text{ Вт}; \quad (5.51)$$

$$Q_{инф2} = 0,28 \cdot 0,75 \cdot 1 \cdot 1,39 \cdot ((22 + 12) / 2 + 5,2) \cdot 79,37 = 514,33 \text{ Вт}; \quad (5.52)$$

$$Q_{инф3} = 0,28 \cdot 3 \cdot 1 \cdot 1,39 \cdot (22 + 5,2) \cdot 79,37 = 2520,7 \text{ Вт}; \quad (5.53)$$

$$Q_{инф} = \frac{398,5 \cdot 92 \cdot 3600 + +514,33 \cdot 28 \cdot 3600 + 2520,7 \cdot 48 \cdot 3600}{1000} = 619404,62 \text{ кДж}. \quad (5.54)$$

Количество тепла, расходуемое на нагрев инфильтрирующего воздуха при стационарном отоплении, рассчитывается по формуле:

$$Q_{инф} = 2520,7 \cdot 168 \cdot 3600 = 1524519,36 \text{ кДж.} \quad (5.55)$$

Общие теплопотери на инфильтрацию за отопительный период при прерывистом отоплении:

$$Q_{год} = Q_1 \cdot 29 = 619404,62 \cdot 29 = 17962,73 \text{ МДж.} \quad (5.56)$$

Общие теплопотери на инфильтрацию за отопительный период при стационарном отоплении:

$$Q_{год} = Q_2 \cdot 29 = 1524519,36 \cdot 29 = 44211,06 \text{ МДж.} \quad (5.57)$$

Годовые теплопотери при прерывистом отоплении:

$$Q_{итог} = Q_{год} + Q_1 = 61072,7 + 1796273 = 79035,43 \text{ МДж.} \quad (5.58)$$

Годовые теплопотери при стационарном отоплении:

$$Q_{итог} = Q_{год} + Q_2 = 72876,7 + 44211,06 = 117087,76 \text{ МДж.} \quad (5.59)$$

Найдём процентный показатель экономии тепловой энергии:

$$\Delta = \frac{(117087,76 - 79035,43)}{117087,76} \cdot 100\% = 32,5\% \quad (5.60)$$

Определим количество природного газа, необходимого для отопления 40 типовых домов коттеджного поселка для двух вариантов по формуле:

$$V = \frac{Q \cdot n}{Q_{н.с.} \cdot \eta}, м^3, \quad (5.61)$$

где $Q, МДж$ - годовые теплопотери коттеджа; $Q_{н.с.}, МДж / м^3$ - низшая теплота сгорания природного газа; η - коэффициент полезного действия отопительного котла; n - количество домов.

Расход газа за отопительный период при прерывистом отоплении:

$$V = \frac{79035,43 \cdot 40}{34,02 \cdot 0,88} = 105600,22 м^3 \quad (5.62)$$

Расход газа за отопительный период при стационарном отоплении:

$$V = \frac{117087,76 \cdot 40}{34,02 \cdot 0,88} = 156442,41 м^3 \quad (5.63)$$

Стоимость 1 м3 газа для Самарской области составляет 5,01 руб.

Определим затраты на оплату газа:

$$Ц = 5,01 \cdot V, руб. \quad (5.64)$$

При прерывистом отоплении:

$$Ц = 5,01 \cdot 105600,22 = 529056,1 руб. \quad (5.65)$$

При стационарном отоплении:

$$Ц = 5,01 \cdot 156442,41 = 783776,57 руб. \quad (5.66)$$

Экономия при использовании прерывистого отопления за год составит 783776,57-529056,1=254720,47 руб.

5.3 Выводы по главе 5.

1. Исходя из значений требуемого времени нагрева ограждающих конструкций получены аналитические зависимости для определения максимально допустимой толщины однослойной наружной стены и максимальной толщины теплоизоляционного слоя в двухслойных наружных стенах, утепленных вентфасадом или сайдингом.

2. Представленное технико-экономическое обоснование применения переменного теплового режима загородных коттеджей показало экономию за оплату энергоресурсов в размере 254720,47 рублей в ценах 2019 года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе проведенных исследований получены приближенные аналитические зависимости для определения энергозатрат и времени нагрева ограждений зданий, эксплуатируемых в условиях прерывистого отопления.

Экспериментальные данные, полученные по нагреву однослойной стенки, показали высокую степень достоверности результатов математического моделирования. Проведенное исследование процесса нестационарной теплопередачи наружных ограждений, утепленных экранной тепловой изоляцией с применением фольгированного пенофола с воздушной прослойкой позволило установить, что энергозатраты на их нагрев снижаются от 27 до 39%. Установлена аналитическая зависимость между энергозатратами на нагрев ограждений и толщиной воздушной прослойки. Разработанная методика определения энергозатрат и времени нагрева ограждающих конструкций рекомендуется для проектирования зданий, эксплуатируемых в условиях переменной отопительной нагрузки.

2. В результате выполненных теоретических и экспериментальных исследований процесса нестационарной теплопередачи в отопительных приборах получено аналитическое решение для определения безразмерной температуры стенки и времени нагрева радиаторов, а также разработана инженерная методика расчета динамических характеристик отопительных приборов. Экспериментальным путём получен поправочный коэффициент в формуле для расчета времени нагрева, учитывающий влияние материала и конструктивные особенности отопительного прибора. Полученные в результате исследований данные рекомендовано учитывать при проектировании систем отопления зданий и сооружений, эксплуатируемых в условиях прерывистого отопления.

3. Разработана высокоэффективная конструкция тепловой изоляции трубопроводов систем теплоснабжения с применением экранированных пенополиуретановых скорлуп, позволяющих за счет наличия воздушной

прослойки снизить расход теплоизолирующего материла на 35%. Проведенные теоретические исследования процесса остывания изолированного трубопровода при нарушении циркуляции воды показали, что с увеличением толщины воздушной прослойки увеличивается время остывания теплоносителя до значений, достаточных для устранения аварийных ситуаций.

Разработанная конструкция тепловой изоляции используется в настоящее время в системах теплоснабжения на территории Самарской области.

4. Исходя из значений требуемого времени нагрева наружных ограждений получены аналитические зависимости для определения максимально допустимой толщины однослойной наружной стены и максимальной толщины теплоизоляционного слоя в двухслойных наружных стенах, утепленных вентфасадом или сайдингом.

5. Оценка энергосберегающего эффекта от применения прерывистого отопления была произведена для 40 домов коттеджного поселка, эксплуатируемых лишь в выходные дни. Расчет показал, что за счет использования дежурного отопления в рабочие дни энергозатраты снизились на 32,5 %. Расчётный годовой экономический эффект за отопительный сезон составил 254720,47 рублей в ценах 2019 года.

6. Предложенная конструкция тепловой изоляции трубопроводов использована ООО НПФ «ПОИСК» при реконструкции теплотрасс на производственных площадках ОАО «Роснефть». Методики теплотехнических расчетов ограждающих конструкций и элементов систем отопления использованы ООО «АСК ТЕХНОСТРОЙ» при проектировании и строительстве индивидуальных жилых домов на территории РФ и республике Казахстан.

Библиографический список

1. Анисимова, Е.Ю. Энергоэффективность теплового режима здания при использовании отопительного режима прерывистого отопления [Текст] / Е.Ю. Анисимова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2012. – №38. – С. 55–59.

2.Анисимова, Е.Ю. Анализ возможности экономии тепловой энергии при прерывистом режиме отопления [Текст] / Е.Ю. Анисимова, В.И. Панферов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2008. – № 12. – С. 30-37.

3. Анисимова, Е.Ю. Эффективность управления микроклиматом здания в нерабочее время [Текст] / Е.Ю. Анисимова, В.И. Панферов // Сантехника. Отопление. Кондиционирование. – М., 2014. – №2. – С.72–78.

4. Богословский, В.Н. Тепловой режим здания [Текст] / В.Н. Богословский. – М: Стройиздат, 1979. – 248 с.

5. Богословский, В.Н. Строительная теплофизика [Текст] / В.Н. Богословский. – М.: Высшая школа, 1982. – 415 с.

6. Богословский, В.Н. Отопление [Текст] / В.Н. Богословский, А.Н. Сканави. – М.: Стройиздат, 1991. – 736 с.

7. Береговой, А. М. Ограждающие конструкции с повышенными теплозащитными качествами [Текст] / А. М. Береговой. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: АСВ, 1999. – 312 с.

8. Береговой, А. М. Энергоэкономичные и энергоактивные здания [Текст] / А. М. Береговой. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: АСВ,1999. – 160 с.

9. Вытчиков, А. Ю. Первый опыт применения монолитного пенобетона в строительстве [Текст] / А. Ю.Вытчиков, М. А.Тихонов, А. П. Шварц // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. –Москва, 2006. – №2. – С. 58-59.

10. Вытчиков, Ю.С. Математическое моделирование процесса нестационарной теплопередачи через строительные ограждающие конструкции в условиях прерывистого отопления [Текст] / Ю.С. Вытчиков, И.Г. Беляков, М.Е. Сапарев // Международный научно-исследовательский журнал. – 2016. – №4(25). – С.42-48.

11. Вытчиков, Ю. С. Оптимизация выбора уровня теплозащиты ограждающих конструкций зданий, эксплуатируемых в условиях прерывистого отопления [Текст] / Ю.С. Вытчиков, М.Е. Сапарёв, А.А. Чулков // Промышленное и гражданское строительство. – Москва, 2017. – №3. – С .90-93.

12. Вытчиков, Ю. С. Теплотехнический расчет перекрытий над неотапливаемым подвалом здания коттеджа, эксплуатируемого в условиях прерывистого отопления [Текст] / Ю.С. Вытчиков, А.А. Чулков, М.Е. Сапарев // Градостроительство и Архитектура. – Самара, 2017. – №2. – С. 27-31.

13. Вытчиков, Ю. С. Повышение эффективности и долговечности тепловой изоляции трубопроводов систем теплоснабжения с применением скорлуп из пенополиуретана [Текст] / Ю.С. Вытчиков, Л.Д. Евсеев, А.А. Чулков // Градостроительство и архитектура. – Самара, 2013. – №2. – С.90-93.

14. Вытчиков, Ю. С. Исследование эффективности применения жидкого керамического покрытия «Корунд» в качестве тепловой изоляции трубопроводов систем теплоснабжения [Текст] / Ю.С. Вытчиков, А.А. Чулков // Научное обозрение. – Москва, 2014. – №4. – С.142-145.

15. Вытчиков, Ю. С. Математическое моделирование процесса нагрева отопительных приборов [Текст] / Ю.С. Вытчиков, А.А. Чулков, В.А. Голиков // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Естественные науки и техносферная безопасность: сборник статей / СГАСУ. – Самара, 2016. – С. 179-183.

16. Вытчиков, Ю.С. Исследование теплозащитных характеристик торцевой наружной стены многоэтажного жилого здания [Текст] / Ю.С. Вытчиков, И.Г. Беляков, А.А. Чулков, И.В. Шайхутдинова // Научное обозрение. – 2015. – № 23. – С. 31-35.

17. Вытчиков, Ю.С. Тепловизионный контроль качества тепловой защиты зданий и сооружений, утепленных с помощью вентилируемых фасадов [Текст]/ Ю.С. Вытчиков, И.Г. Беляков, А.А. Чулков, И.В. Шайхутдинова // Научное обозрение. – 2015. – № 23. – С. 54-58.

18. Вытчиков, Ю.С. Применение изделий из пенополиуретана в качестве эффективной тепловой изоляции трубопроводов систем теплоснабжения [Текст] / Ю.С. Вытчиков, И.Г. Беляков, А.Ю. Вытчиков // Безопасность и логистика транспортных систем: труды Международной научно-практической конференции. – Самара, 2004. – С. 20-25.

19. Гагарин, В. Г. Учет теплотехнических неоднородностей при оценке теплозащиты ограждающих конструкций в России и европейских странах [Текст] / В. Г. Гагарин , К.А. Дмитриев // Строительные материалы. – №3. – Москва, 2013. – С. 14-16.

20. Гагарин, В.Г. О нормировании теплопотерь через оболочку здания [Текст] / В.Г.Гагарин, Козлов В. В. // Academia. Архитектура и строительство. – 2010. – № 3. – С. 279–286.

21. Галицков, С.Я. Экспериментальный стенд для исследования динамики теплоотдачи отопительной установки в помещении [Текст] / С.Я. Галицков, А.А. Чулков, В.А. Голиков, М.А. Назаров // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительные технологии: сборник статей / СГАСУ. – Самара, 2016. – С. 466-471.

22. Горшков, А. С. Диаграммный метод описания процесса нестационарной теплопередачи [Текст] / А.С. Горшков, П.П. Рымкевич // Инженерно-строительный журнал. – Спб., 2015. – №8. – С.68-82.

23. Горшков, А. С. Моделирование процессов нестационарного переноса тепла в стеновых конструкциях из газобетонных блоков [Текст] / А.С. Горшков, П.П. Рымкевич, Н.Н. Ватин // Инженерно-строительный журнал. – СПб., 2014. – №8. – С.38-48.

24. Гурьев, В.В. Тепловая изоляция в промышленности. Теория и расчет [Текст] / В.В. Гурьев, В.С. Жолудов, В.Г. Петров-Денисов. – М.: Стройиздат, 2003. – С.415.

25. ГОСТ Р 53583-2009. Приборы отопительные. Методы испытаний. [Текст]. – М.: Стандартинформ, 2010. – 20 с.

26. ГОСТ 7076-99 Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме [Текст]. – М.: Госстрой России, ГУП ЦПП, 2000. – 27 с.

27. ГОСТ 26254-84. Здания и сооружения. Методы определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций [Текст]. – М.: Издательство стандартов, 1984. – 26 с.

28. Гримитлин, А.М. Энергоэффективность: Помехи и успехи [Текст] / А.М. Гримитлин // Сантехника, отопление, кондиционирование. – 2015. – № 7. – С. 86-87.

29. Дацюк, Т.А. Моделирование теплового режима жилых помещений при прерывистом отоплении [Текст] / Т.А. Дацюк, Ю.П. Ивлев, В.А. Пухкал // Современные проблемы науки и образования. – Москва, 2014. – №5. – С. 69-70.

30. Дацюк, Т.А. Моделирование микроклимата жилых помещений [Текст] / Т.А. Дацюк, В.Р. Таурит // Вестник гражданских инженеров. – СПб.,2012. – №4. – С.196-198.

31. Дацюк, Т.А. Результаты моделирования микроклимата жилых помещений при различных типах отопительных приборов [Текст] / Т.А.

Дацюк, Ю.П. Ивлев, В.А. Пухкал // Инженерно-строительный журнал. – 2013. – №6. – С.12-21.

32. Дацюк, Т.А. Оценка показателей энергоэффективности зданий [Текст] / Т.А. Дацюк, А.М. Гримитлин, Е.А. Аншукова // Вестник гражданских инженеров. – 2018. – №5. – С.141-145.

33. Дулькин, А.Б. Оценка времени замерзания воды в трубопроводе [Текст] / А.Б. Дулькин, Б.А. Дулькин, А.Б. Голованчиков // Известия Волгоградского государственного технического университета, 2014. – №1. С. 19-22.

34. Ерёмкин, А. И. Экономика энергосбережения в системах отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха: учебное пособие [Текст] / А. И. Ерёмкин, Т. И. Королёва, Г. В. Данилик, В. В. Бызеев, А. Г Аверкин. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2008. – 184 с.

35. Захаревич, А.Э. Экономия тепловой энергии при прерывистом отоплении [Текст] / А.Э. Захаревич // Сантехника, отопление, кондиционирование. – 2014. – № 1. – С. 64-67.

36. Измеритель теплопроводности ИТП-МГ4 «250». Руководство по эксплуатации [Текст]. – Челябинск: ООО «СКБ Стройприбор», 2012. – 35 с.

37. Исаченко, В.П. Теплопередача: учеб.для втузов [Текст] / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.

38. Иванов, В.В. Исследование процессов нагрева помещения после включения источника теплоты [Текст] / В.В. Иванов, С.А. Никитин, Л.В. Карасева, А.И. Семенчук // Научный вестник ВГАСУ– 2011. – № 3. – С. 34-39.

39. Иванов, В.В. Процессы прогрева ограждающих конструкций после включения источника теплоты [Текст] / В.В. Иванов, Л.В. Карасева // Научный вестник ВГАСУ– 2013. – № 4. – С. 49-53.

40. Ковалевский, В.И. Методы теплового расчета экранной изоляции [Текст] / В.И. Ковалевский, Г.П. Бойков. – М.: Энергия, 1974. – 199 с.

41. Кочев, А.Г. Тепломассообмен в зданиях и инженерном оборудовании: учеб. пособие [Текст] / А.Г. Кочев, М.М. Соколов, Е.А. Кочева, А.С. Москаева; Нижегор. гос. архитекур. – строит. ун-т. – Н. Новгород: ННГАСУ, 2017. – 88 с.

42. Кочев, А.Г. Теоретические основы решения задач тепло- и массообмена в православных храмах [Текст] / А.Г. Кочев // Вестник Волжского регионального отделения Российской академии архитектуры и строительных наук. – 2003. – №6. С.169-183.

43. Кудинов, А.А. Строительная теплофизика: учеб. пособие [Текст] / А.А. Кудинов. – М: ИНФРА – М, 2013. – 262 с.

44. Кудинов, И.В. Разработка конструкции и способов экспериментального определения мощности отопительных приборов [Текст] / И.В. Кудинов // Повышение энергоэффективности зданий и сооружений: Межвузовский сборник научных трудов / СГАСУ. – Самара, 2011. – №6. – С.168.

45. Кузнецов, Г.В. Тепловые потери подземных канальных теплопроводов в условиях деформации слоя тепловой изоляции с учетом радиационного теплообмена в полости канала [Текст] / Г.В. Кузнецов, В.Ю. Половников // Magazine of Civil Engineering. – №2. – 2012. – С. 12-16.

46. Кузнецов, Г.В. Тепловые потери магистральных трубопроводов в условиях полного или частичного затопления [Текст]/ Г.В. Кузнецов, В.Ю. Половников // Проблемы энергетики. – 2006. – №3-4. – С.3-12.

47. Кузнецов, Г.В. Разностные методы решения задач теплопроводности: учебное пособие [Текст] / Г.В. Кузнецов, М.А. Шерехмет // Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2007. – 172 с.

48. Кононович, Ю.В. Тепловой режим зданий массовой застройки [Текст] / Ю.В. Кононович. М.:Стройиздат, 1986. – С.160.

49. Китаев, Д.Н. Современные отопительные приборы и их показатели [Текст] / Д.Н. Китаев // Сантехника, отопление, кондиционирование. – 2014. – № 1. – С. 53-57.

50. Лапин, В.М. Энергоэффективность отопительных приборов с различной тепловой инерцией на прерывистых режимах отопления [Текст] / В.М. Лапин // АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная физика. –№8. – 2012. – С.48-51.

51. Лыков, А. В. Теоретические основы строительной теплофизики [Текст] / А. В. Лыков. – Минск: Наука и техника, 1961. – 519 с.

52. Лыков, А. В. Теория теплопроводности [Текст] / А. В. Лыков. – М.: Высшая школа, 1967. – 599 с.

53. Лыков, А. В. Тепломассообмен: Справочник / А. В. Лыков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1978. – 480 с.

54. Лыков, А.В. Теория тепло- и массопереноса [Текст] / А.В. Лыков, Ю.А. Михайлов. – М.: Госэнергоиздат, 1963. – 535 с.

55. Ляликов, А. С. Теплопередача со сложным теплообменом: учеб. пособие [Текст] / А. С. Ляликов. – Томск: ТПИ, 1982. – 96 с.

56. Матросов, Ю. А. Энергосбережение в зданиях. Проблема и пути ее решения [Текст] / Ю. А. Матросов. – М.: НИИСФ, 2008. – 496 с.

57. Малявина, Е.Г. Сопряженный расчет нестационарного теплового режима водяной системы отопления и здания [Текст] / Е.Г. Малявина, Д.Ю. Петров // Жилищное строительство. – 2013. – №6. – С. 66-69.

58. Малявина, Е.Г. Влияние теплового режима наружных ограждающих конструкций на нагрузку системы отопления при прерывистой подаче теплоты [Текст] / Е.Г. Малявина, Р.Р. Асатов // Academia. Архитектура и строительство. – 2010. –№3. – С. 324-327.

59. Малявина, Е.Г. Влияние различных факторов на темп остывания помещения после отключения теплоснабжениям [Текст] / Е.Г. Малявина, А.В. Цыганков // Известия вузов. Строительство. – 2015. – №1. – С.53-59.

60. Мишин, М.А. Исследование процессов остывания теплоносителя при прерывистом регулировании отопления [Текст] / М.А. Мишин // Ползуновский вестник. –2010. – №1. – С.146-150.

61. Михеев, М. А. Основы теплопередачи: учеб.для вузов [Текст] / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – 2-е изд., стереотип. – М.: Энергия,1977. – 344 с.

62. Примак, Л.В. Энергосбережение и повышение энергетической эффективности в государственных и муниципальных учреждениях [Текст] / Л.В. Примак. – М.: Академический проект, 2013. – 552 с.

63. Пухкал, В.А. Исследование инерционности отопительных приборов [Текст] / В.А. Пухкал // Современные проблемы науки и образования. – 2014. –№5. – С. 278-281.

64. Рабинович, Г. Д. Теория теплового расчета рекуперативных теплообенных аппаратов [Текст] / Г. Д. Рабинович. – Минск: Изд-во АН БССР, 1963.– 216 с.

65. Рабинович, С. Г. Погрешности измерений [Текст] / С. Г. Рабинович. – М.: Энергия, 1978. – 262 с.

66. Семенов, В.Н. Нестационарная теплопередача и эффективность теплозащиты ограждающих конструкций зданий [Текст] / В.Н. Семенов. – Саратов: Сарат. гос. тех. у-т, 1996. – 176 с.

67. СП 131.13330.2018. Строительная климатология [Текст]. – М.: Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации, 2018. – 116 с.

68. СП 23-101-2004. Проектирование тепловой защиты зданий [Текст]. - М.: Госстрой России, 2004. - 86с.

69. СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий [Текст]. – М.: Минрегион России, 2012. – 95 с.

70. СП 61.13330.2012. Тепловая изоляция оборудования [Текст]. – М.: Минрегион России, 2012. – 43 с.

71. СП 230.1325800.2015. Конструкции ограждающие зданий. Характеристики теплотехнических неоднородностей [Текст]. – М.: Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации, 2015. – 98 с.

72. СТО 00044807-001-2006. Теплозащитные свойства ограждающих конструкций зданий [Текст]. – М.: РОИС, 2006. – 67 с.

73. Соколов, Е.Я. Теплофикация и тепловые сети // Учебник для вузов [Текст]. – 7-е изд.стереот. – М.: Издательство МЭИ,2001. – 472 с.

74. Староверов, И.Г. Справочник проектировщика. Внутренние санитарно-технические устройства. Часть 1. Отопление [Текст] // Под редакцией И.Г. Староверова, Ю.И. Шиллера. – М.: Стройизда,1990. – 343 с.

75. Суханов, К.О. Микроклимат жилых помещений с плинтусной системой водяного отопления и подачей приточного воздуха через регулируемые оконные створки [Текст] / О.К. Суханов, А.М. Гримитлин, А.Л. Шкаровский // Вестник гражданских инженеров. – 2017. – №5. – С.111-115.

76. Табунщиков, Ю. А. Тепловая защита ограждающих конструкций зданий и сооружений [Текст] / Ю. А. Табунщиков, Д. Ю. Хромец, Ю. А. Матросов. – М.: Стройиздат, 1986. – 373 с.

77. Табунщиков, Ю. А. Энергоэффективные здания [Текст] / Ю. А. Табунщиков, М. М. Бродач, Н. В. Шилкин. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2003. – 200 с.

78. Тепловая изоляция: Справочник строителя [Текст] / Под ред. Г.Ф. Кузнецова. – М.: Стройиздат, 1985. – 421 с.

79. Туркин, В.П. Автоматическое управление отоплением жилого здания [Текст] / В.П. Туркин, П.В. Туркин, Ю.Д. Тыщенко. – М.: Стройиздат,1987. – 192 с.

80. Фокин, К. Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий [Текст] / К. Ф. Фокин. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1973. – 287 с.

81. Хижняков, С. В. Практические расчеты тепловой изоляции промышленного оборудования и трубопроводов [Текст] / С. В. Хижняков. – М.: Энергия, 1976. – 200 с.

82. Цветков, Н.А. Закономерности температурных режимов наружных деревянных стен из бруса в пределах случая охлаждения [Текст] / Н.А. Цветков, А.И. Бородин, Е.А. Иванова // Вестник ТГАСУ. – 2007. – №2. – С.161-168.

83. Цветков, Н.А. Физико-математическая модель тепловлагопереноса в ограждающих конструкциях из профилированного теплового бруса [Текст] / Н.А. Цветков, А. Н. Хуторной, А.В. Толстых, А.В. Колесникова // Известия высших учебных заведений. Сроительство. – 2017. – № 2. – С.12-20.

84. Чулков, А.А. Исследование динамических характеристик отопительных приборов [Текст] / А.А. Чулков, Ю.С. Вытчиков, И.В. Кудинов // Градостроительство и Архитектура. – 2016. – №4. – С.44-48.

85. Чулков, А.А. Исследование теплопроводности тепловой изоляции трубопровода системы теплоснабжения [Текст] / А.А. Чулков, А.С. Прилепский, В.Г. Титов // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Естественные науки и техносферная безопасность: сборник статей / СГАСУ. – Самара, 2016. – С. 199-202.

86. Чулков, А.А. Тепловизионный контроль качества тепловой защиты тепловой сети нового пассажирского терминала международного аэропорта Курумоч г. Самары [Текст] / А.А. Чулков // Градостроительство и архитектура. – 2015. – № 2 (19). – С. 107-112.

87. Чулков, А.А. Оценка времени остывания теплоносителя в изолированных трубопроводах систем теплоснабжения при аварийных ситуациях [Текст] / А.А. Чулков // Традиции и инновации в строительстве и

архитектуре. Строительные технологии: сборник статей / Самара, 2019. – С. 479-481.

88. Шкловер, А.М. Основы строительной теплотехники жилых и общественных зданий [Текст] / А.М. Шкловер, Б. Ф. Васильев, Ф. В. Ушков. – М.: Госстройиздат, 1956. – 350 с.

89. Щукина, Т.В. Регулируемой тепловой режим пассивной утилизации солнечного излучения для снижения нагрузок на системы отопления [Текст] / Т.В. Щукина, Р.А. Шепс, М.Н. Жерлыкина // Сантехника, отопление, кондиционирование. – 2016. – № 11. – С. 55-59.

90. Щукина, Т.В. Энергосбережение в системах обеспечения микроклимата зданий при утилизации теплоты вентиляционных выбросов [Текст] / Т.В. Щукина, М.Н Жерлыкина, С.А. Соловьев, П.И. Манцуров // Градостроительство. Инфраструктура. Коммуникации. – 2016. – № 3. – С. 30-34.

91. Yuri Vytchikov, Mikhail Saparev, Alexandr Chulkov. Analyzing screen heat insulation and its effect on energy consumption while heating building envelopes in conditions of intermittent heating // MATEC Web of Conferences 86, IPICSE-2016. DOI: 10.1051/matecconf/20168604019.

92. Yuri Vytchikov, Mikhail Saparev, Alexandr Chulkov. Analyzing energy consumption while heating one-layer building envelopes in conditions of intermittent heating. MATEC Web of Conferences 106,06013(2017), SPbWOSCE-2016.DOI: 10.1051/matecconf/20171060613.

93. McPherson R. E., Stuart H. D. // Nuclear Sci. and Eng., 1962, № 12.

94. Vortmeyer D., Kasparek G. Radiative heat transfer in packed beds // Papers ISiME Semi-Intern. Symp., Tokyo, 1967.

95. Hering R. G. Radiative heat exchange between conducting plates with specular reflection // Paper Amer. Soc. Mech. Engrs., 1966, № HT-28.

96. Colas F. L'utilisation de l'aluminium en calorifugeage // Rev. I'aluminium, 1963, № 30.

97. Теплоизоляционное изделие из пенополиуретана [Текст]: пат.178409 Рос.Федерация : МПК F16L 59/00 (2006.01).

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

Теплофизический расчет ограждающих конструкций

Район строительства – Самарская область

В данном приложении представлены результаты теплофизического расчета пяти вариантов исполнения кирпичных наружных стен с внутренним утеплением монолитным пенобетоном.

На рисунке А.1 показан разрез по наружной стене (исполнение 3)

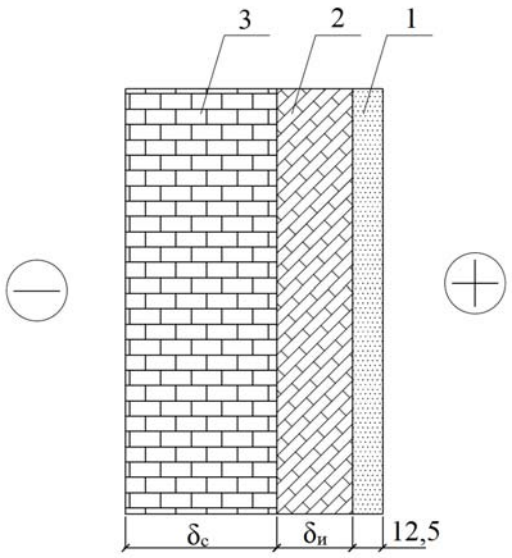


Рисунок А.1. Разрез по наружной стене (исполнение 3)

1 слой – гипсокартон, $\delta_1 = 0{,}0125$ м; $\gamma_1 = 800$ кг/м^3; $\lambda_1 = 0{,}19$ Вт/(м·ºС); $\mu_1 = 0{,}075$ мг/м·ч·Па;

2 слой – монолитный пенобетон, $\delta_2 = 0{,}15$ м; $\gamma_2 = 300$ кг/м^3; $\lambda_2 = 0{,}1$ Вт/(м·ºС); $\mu_2 = 0{,}25$ мг/м·ч·Па;

3 слой – кладка из силикатного кирпича на цементно-песчаном растворе, $\delta_3 = 0{,}38$ м; $\gamma_3 = 1800$ кг/м^3; $\lambda_3 = 0{,}76$ Вт/(м·ºС); $\mu_3 = 0{,}11$ мг/м·ч·Па;

Расчет выполнен по методике, изложенной в СП 50.13330.2012 [64] в следующей последовательности:

1. Определялось требуемое сопротивление теплопередаче наружной стены по формуле:

$$R_0^{тр} = \frac{n(t_в - t_н)}{\alpha_в \cdot \Delta t_н} = \frac{1 \cdot (22 + 30)}{8{,}7 \cdot 4} = 1{,}49 \ \text{(м}^2\text{·ºС)/Вт}$$

2. Приведенное сопротивление теплопередаче наружной стены согласно [69] находилось по формуле:

$$R_0^{пр} = r \cdot R_0^{усл}, (м^2 \cdot ºС)/Вт,$$

где r – коэффициент теплотехнической однородности, определяемый согласно [72];

$$R_0^{пр} = 0,85 \cdot \left(\frac{1}{8,7} + \frac{0,0125}{0,19} + \frac{0,15}{0,1} + \frac{0,38}{0,78} + \frac{1}{23} \right) = 0,85 \cdot 2,224 = 1,89 \ (м^2 \cdot ºС)/Вт.$$

$$R_0^{пр} > R_0^{тр}; \ 1,89 > 1,49 \ (м^2 \cdot ºС)/Вт.$$

3. Коэффициент теплопередачи глади наружной стены:

$$k = \frac{1}{R_0^{усл}} = \frac{1}{2,22} = 0,45 \ Вт/(м^2 \cdot ºС).$$

4. Сопротивления паропроницанию глади наружной стены:

$$R_{n_0} = \sum_{i=1}^{3} R_{n_i} = \frac{\delta_1}{\mu_1} + \frac{\delta_2}{\mu_2} + \frac{\delta_3}{\mu_3} = \frac{0,0125}{0,075} + \frac{0,15}{0,25} + \frac{0,38}{0,11} = 0,167 + 0,6 + 3,455 = 4,22 \ (м^2 \cdot ч \cdot Па)/мг$$

.

5. Значение упругости внутреннего воздуха определялось по формуле:

$$e_в = E_в \frac{\varphi_в}{100} = 2644 \cdot \frac{55}{100} = 1454 \ Па.$$

6. Определялось значение комплекса $F\left(t_{k_i}\right)$ для всех трех слоёв наружной стены по формуле:

$$F\left(t_{k_i}\right) = 5330 \frac{\mu_i}{\lambda_i} \frac{R_{n_0}}{R_0^{усл}} \frac{t_в - t_{н.о.}}{e_в - e_{н.о.}}, \ (ºС)^2/Па,$$

где μ_i, λ_i – коэффициент паропроницаемости и теплопроводности i-го слоя наружной стены соответственно;

$t_{н.о.}$, $e_{н.о.}$ – средняя температура наружного воздуха и парциальное давление водяного пара периода месяцев с отрицательными температурами соответственно.

$$F\left(t_{k_1}\right) = 5330 \cdot \frac{0,075}{0,19} \cdot \frac{4,22}{2,22} \cdot \frac{22 + 8,98}{1454 - 310} = 108,4 \ (ºС)^2/Па.$$

$$F\left(t_{k_2}\right) = 5330 \cdot \frac{0,25}{0,10} \cdot \frac{4,22}{2,22} \cdot \frac{22 + 8,98}{1454 - 210} = 685 \ (ºС)^2/Па.$$

$$F\left(t_{k_3}\right)=5330\cdot\frac{0{,}11}{0{,}76}\cdot\frac{4{,}22}{2{,}22}\cdot\frac{22+8{,}98}{1454-210}=39{,}8\,(^{o}\text{C})^2/\text{Па}.$$

7. Значения температуры в плоскости возможной конденсации определялись по СП 50.13330.2012 [64]:

$$t_{k_1}=1{,}5^{\circ}\text{C};\ t_{k_2}=-24{,}5^{\circ}\text{C};\ t_{k_3}=16\ ^{\circ}\text{C}.$$

Плоскость возможной конденсации находится во втором слое.

8. Координата плоскости возможной конденсации рассчитывалась по формуле:

$$x_2=\lambda_2\left(\frac{t_в-t_{k_2}}{q}-\frac{1}{\alpha_в}-R_1\right),\text{м}$$

где $q=\frac{t_в-t_{н.о.}}{R_0^{усл}}$ – удельный тепловой поток, Вт/м^2;

$$q=\frac{22+8{,}98}{2{,}22}=13{,}95\ \text{Вт/м}^2$$

$$x_2=0{,}10\left(\frac{22+24{,}5}{13{,}95}-\frac{1}{8{,}7}-\frac{0{,}0125}{0{,}19}\right)=0{,}315\ \text{м}.$$

Так как $x_2>\delta_2$ (0,15 > 0,15 м) плоскость возможной конденсации совпадает с наружной поверхностью монолитного пенобетона.

9. Находились значения температуры в плоскости возможной конденсации для трёх периодов года согласно [69].

а) зимний период:

$$t_{k_2}=t_в-\frac{t_в-t_{н_1}}{R_0^{усл}}\left(\frac{1}{\alpha_в}+\sum_{i=1}^{2}R_i\right)=22-\frac{22+10{,}38}{2{,}22}\left(\frac{1}{8{,}7}+\frac{0{,}0125}{0{,}19}+\frac{0{,}15}{0{,}10}\right)=-2{,}5\,^{o}\text{C}$$

.

$E_1=496$ Па.

б) переходный период:

$$t_{k_2} = t_в - \frac{t_в - t_{н_2}}{R_0^{усл}}\left(\frac{1}{\alpha_в} + \sum_{i=1}^{2} R_i\right) = 22 - \frac{22-0,4}{2,22}\cdot 1,68 = 5,7\,^{o}\text{C}.$$

$E_2 = 916$ Па.

в) летний период:

$$t_{k_2} = t_в - \frac{t_в - t_{н_3}}{R_0^{усл}}\left(\frac{1}{\alpha_в} + \sum_{i=1}^{2} R_i\right) = 22 - \frac{22-15,15}{2,22}\cdot 1,68 = 16,8\,^{o}\text{C}.$$

$E_3 = 1913$ Па.

10. Значение упругости водяного пара в плоскости возможной конденсации за годовой период эксплуатации:

$$E = \frac{1}{12}\left(E_1 \cdot Z_1 + E_2 \cdot Z_2 + E_3 \cdot Z_3\right) = \frac{1}{12}\cdot\left(496\cdot 4 + 916\cdot 2 + 1913\cdot 6\right) = 1275 \text{ Па}.$$

11. Требуемое сопротивление паропроницанию из условия недопустимости накопления влаги в наружной стене за годовой период эксплуатации:

$$R_{п1}^{тр} = \frac{\left(e_в - E\right)\cdot R_{пн}}{E - e_н} = \frac{\left(1454-1275\right)\cdot 3,45}{1275-720} = \frac{617,6}{555} = 1,11\,(\text{м}^2\cdot\text{ч}\cdot\text{Па})/\text{мг}.$$

$$R_{пн} = \frac{\delta_3}{\mu_3} = \frac{0,38}{0,11} = 3,45\,(\text{м}^2\cdot\text{ч}\cdot\text{Па})/\text{мг}.$$

12. Сопротивление паропроницанию наружной стены в пределах от внутренней поверхности до плоскости возможной конденсации:

$$R_п = \frac{\delta_1}{\mu_1} + \frac{\delta_2}{\mu_2} = \frac{0,0125}{0,075} + \frac{0,15}{0,25} = 0,767\,(\text{м}^2\cdot\text{ч}\cdot\text{Па})/\text{мг}.$$

Следовательно, возможно накопление влаги в наружной стене за годовой период эксплуатации.

13. Значение упругости водяного пара в плоскости возможной конденсации за период с отрицательными температурами:

$$\tau_2 = t_в - \frac{t_в - t_{н.о.}}{R_0^{усл}} \cdot \left(\frac{1}{\alpha_в} + \sum_{i=1}^{2} R_i \right) = 22 - \frac{22 + 8{,}98}{2{,}22} \cdot 1{,}68 = -1{,}45\,^{\circ}\text{C}.$$

$E_о$ =540 Па.

14. Требуемое сопротивление паропроницанию из условия ограничения накопления влаги за период с отрицательными температурами:

$$R_{n_2}^{mp} = \frac{0{,}0024 \cdot Z_0 \cdot (e_в - E_0)}{\gamma_2 \cdot \delta_2 \cdot \Delta\omega_{ср} + \eta};$$

$$\eta = \frac{0{,}0024 \cdot (E_0 - e_{н.о.}) \cdot Z_0}{R_{п.н.}};$$

$$\eta = \frac{0{,}0024 \cdot (540 - 310) \cdot 151}{3{,}45} = 24{,}16;$$

$$R_{n_2}^{mp} = \frac{0{,}0024 \cdot 151 \cdot (1454 - 540)}{300 \cdot 0{,}15 \cdot 6 + 24{,}16} = 1{,}13\ (\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})/\text{мг}.$$

Следовательно, накопление влаги в наружной стене за период месяцев с отрицательными температурами превышает допустимое значение.

Требуется установка пароизоляции с внутренней поверхности монолитного пенобетона.

В качестве пароизоляции рекомендуется использовать ИЗОСПАН толщиной 0,25 мм с сопротивлением паропроницанию $R_{n_{из}} = 7{,}0\ (\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})/\text{мг}$.

После установки пароизоляции сопротивление паропроницанию $R_n = 7{,}77\ (\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})/\text{мг}$, что существенно выше требуемых значений $R_{n_1}^{mp}$ и $R_{n_2}^{mp}$.

По изложенной выше методике был выполнен расчет влажностного режима для остальных вариантов исполнения наружных стен с внутренним утеплением монолитным пенобетоном. Результаты расчета представлены в

таблице А.1, из которой видно, что накопление влаги происходит во всех рассмотренных вариантах наружных стен.

Таблица А.1. Результаты расчета

№	Конструкция наружной стены	Толщина кладки δ_c, мм	Толщина теплоизоляции $\delta_и$, мм	$R_0^{усл}$, $\frac{м^2 \cdot ^0 C}{Вт}$	$R_п$, $\frac{м^2 \cdot ч \cdot Па}{мг}$	$R_{п1}^{тр}$, $\frac{м^2 \cdot ч \cdot Па}{мг}$	$R_{п2}^{тр}$, $\frac{м^2 \cdot ч \cdot Па}{мг}$	$\Delta R_п^{тр}$, $\frac{м^2 \cdot ч \cdot Па}{мг}$	$R_{п\,из}^{ф}$, $\frac{м^2 \cdot ч \cdot Па}{мг}$
1	Рис.2.8	120	180	2,18	0,89	0,87	1,15	0,260	7,0
2		250	170	2,25	0,847	1,23	1,12	0,383	7,0
3		380	150	2,22	0,767	1,11	1,13	0,363	7,0
4		510	130	2,20	0,687	0,58	1,09	0,403	7,0
5		640	120	2,27	0,647	0,04	1,02	0,373	7,0

Примечание: $\Delta R_п^{тр}$ – требуемое сопротивление паропроницанию пароизоляции,

$R_{п\,из}^{ф}$ – сопротивление паропроницанию пароизоляционной мембраны марки «Изоспан С».

Приложение Б

Теплотехнический расчет фрагмента наружной стены

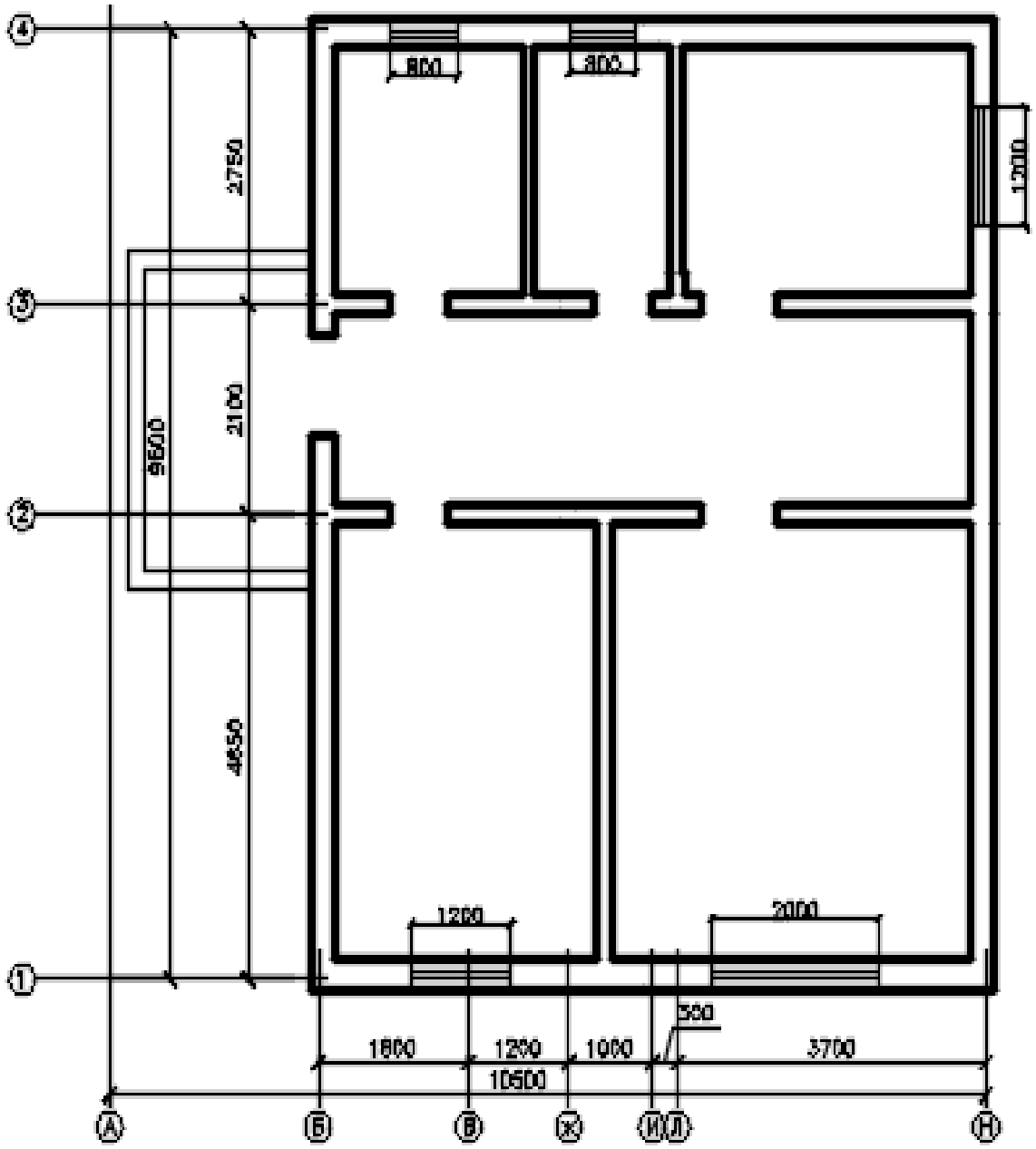


Рисунок Б.1.План дома.

На рисунке Б.1.представлен план дома, для которого выполнен расчет технико-экономических показателей, подробно описанный в главе 5.

Приведенное сопротивление теплопередаче фрагмента наружной стены определяем по формуле:

$$R_0^{np} = \frac{\sum_{i=1}^{n} F_i}{\frac{F_1}{R_{01}} + \frac{F_2}{R_{02}} + ... + \frac{F_n}{R_{0n}}}, \text{ (м}^2\,^{o}\text{C)/Вт},$$

где F_i – площадь i-ой зоны фрагмента наружной стены, м ^{2};

R_{0i} – сопротивление i-ой зоны фрагмента наружной стены, (м ^{2} ^{o}C)/Вт.

Для фрагмента наружной стены разработаны строительные узлы: горизонтальные и вертикальные. Расчетная схема конструкции наружной стены представлена на рисунках Б.1-Б.2, характеристики материалов - в таблице Б.1. Температурные поля в строительных узлах приведены на рисунках Б.3 – Б.8. Расчет производился с помощью метода конечных элементов, реализованного в программе THERM 7.6.0. Анализ приведенных результатов расчета показал, что температура внутренней поверхности наружных стен, оконных откосов и перекрытий превышает значение температуры точки росы при расчетных параметрах внутреннего воздуха.

Результаты теплотехнического расчета фрагмента наружной стены сведены в таблицу Б.2.

Приведенное сопротивление теплопередаче фрагмента наружной стены:

$$R_0^{np} =$$

$$((1,43+1,69+1,12+1,78+0,6+0,96)+(0,3+0,3+0,26+0,26))/((1,43/19,9+1,69/19,45+1,12/1$$

$$9,28+$$

$$+1,78/19,2+0,6/19,37+0,96/19,48)+(0,3/18,64+0,3/18,71+0,26/16,68+0,26/19,82))=$$

$$=2,23 \text{ м}^2\,^{o}\text{C/Вт}$$

Для определения удельного расхода тепла на отопление здания отдельно для рассматриваемого фрагмента наружной стены определили приведенное сопротивление теплопередаче глади наружной стены и оконных откосов.

Приведенное сопротивление теплопередаче глади наружной стены:

$$R_0^{np} = (1,43+1,69+1,12+1,78+0,6+0,96)/(1,43/19,9+1,69/19,45+1,12/19,28+$$

+1,78/19,2+0,6/19,37+0,96/19,48)=2,34 м ^{2}ºС/Вт

Приведенное сопротивление теплопередаче оконных откосов:

$$R_0^{np} = (0,3+0,3+0,26+0,26)/(0,3/18,64+0,3/18,71+0,26/16,68+0,26/19,82))=$$

$$=1,69 \text{ м}^2\text{ºС/Вт}$$

Коэффициент теплотехнической однородности для данного фрагмента наружной стены составил:

$$r = (R_0^{np})_\phi \big/ R_0 = 2,23/2,53=0,88$$

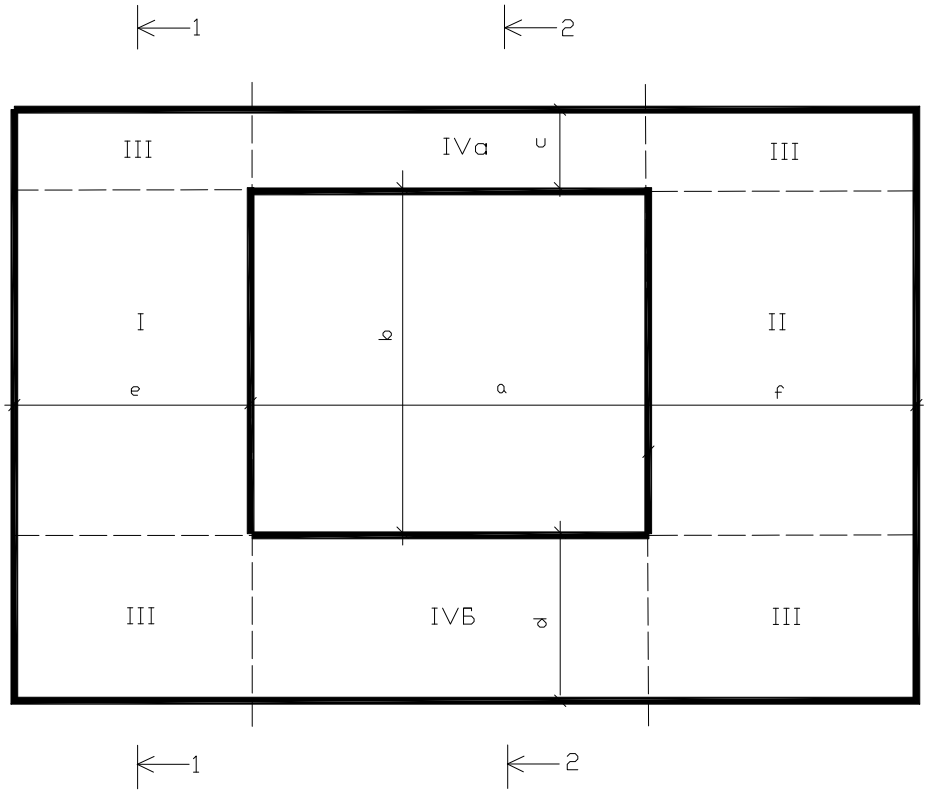


Рисунок Б.1. - Расчетная схема фрагмента наружной стены:

размеры окна: a =1200 мм; b = 1400 мм;
размер простенка: e = 1020 мм; угол: f = 1210 мм;
расстояние от верхнего откоса до плиты: c = 500 мм;
расстояние от подоконной доски до пола: d = 800 мм

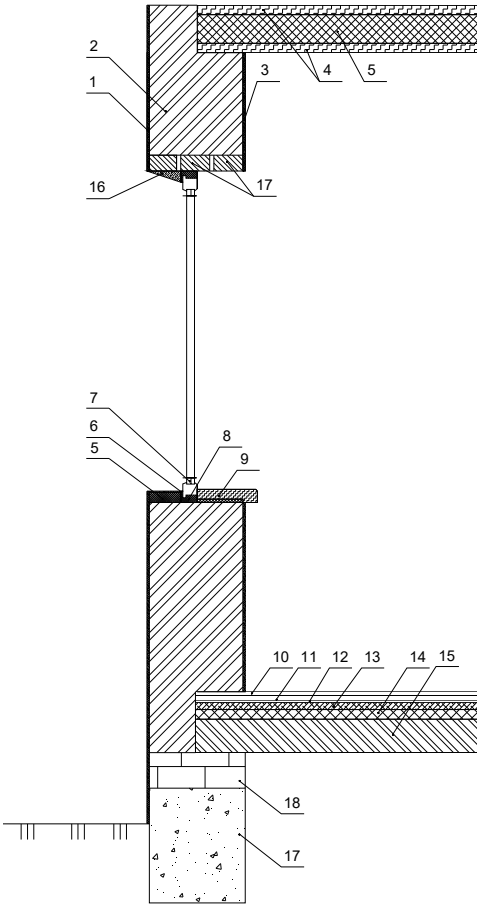


Рисунок Б.2 - Вертикальное сечение по наружной стене (Узел IVа - IVб)

Таблица Б.1. Характеристики материалов строительного узла.

№ п/п	Наименование материала	Плотность, ρ, кг/м³	Коэффициент теплопроводности λ, Вт/(м°С)
1.	Фактурный слой фасадной системы	1800	0,7
2.	Кладка из газобетонных блоков на клеевом растворе	600	0,17
3.	Гипсовая штукатурка	800	0,3
4.	Древесина	500	0,18
5.	Базальтовая теплоизоляция	145	0,04
6.	ПСУЛ (герметик)	---	0,16
7.	Оконный профиль	1400	0,2
8.	Макрофлэкс	20	0,035
9.	Подоконная доска	500	0,14
10.	Линолеум	1000	0,33
11.	Подоснова	150	0,047
12.	Битумная мастика	1000	0,17
13.	Монолитный пенобетон	400	0,14
14.	Пеноплекс	30	0,03
15.	Железобетонная плита перекрытия	2400	1,74
16.	Цементно-песчаный раствор	1800	0,76
17.	Железобетонные перемычки/железобетон	2500	1,92
18.	Кладка из кирпича керамического на ц/п р-ре	1800	0,70

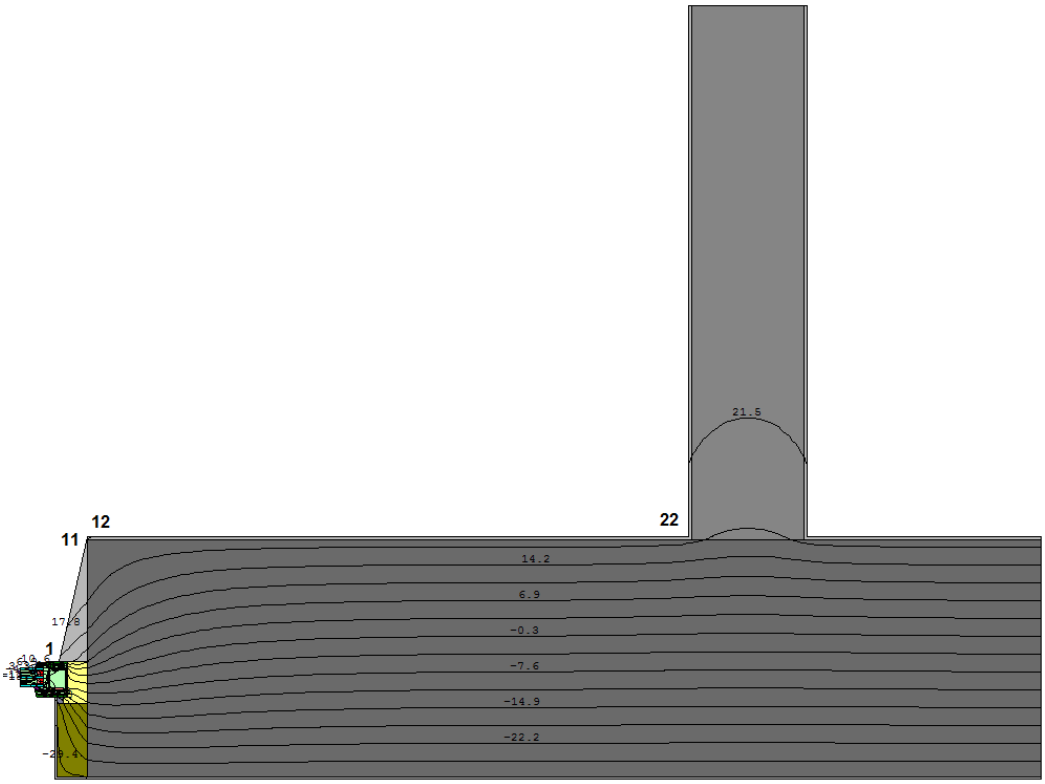


Рисунок Б.3. - Температурное поле в простенке узла I (сечение по наружной стене)

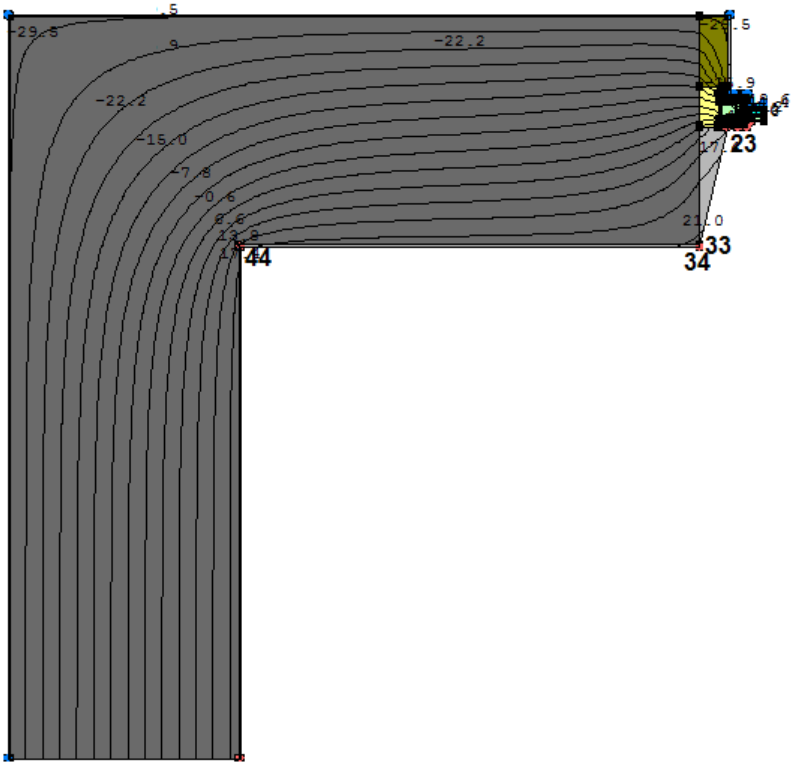


Рисунок Б.4. - Температурное поле в узле II (сечение по наружной стене - угол)

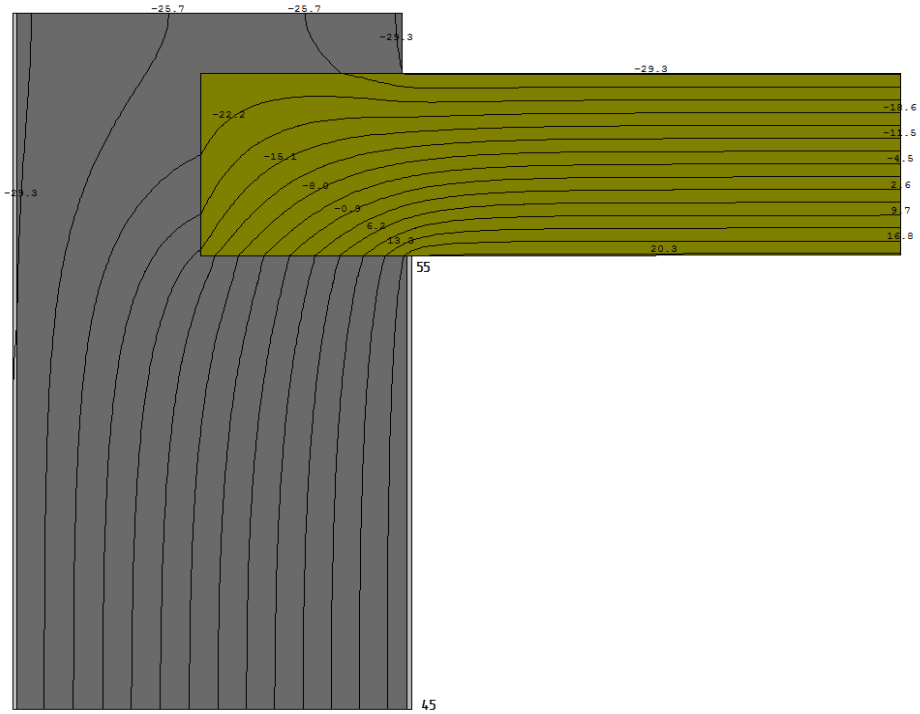


Рисунок Б.5. - Температурное поле в узле III до потолка (сечение по наружной стене III-III)

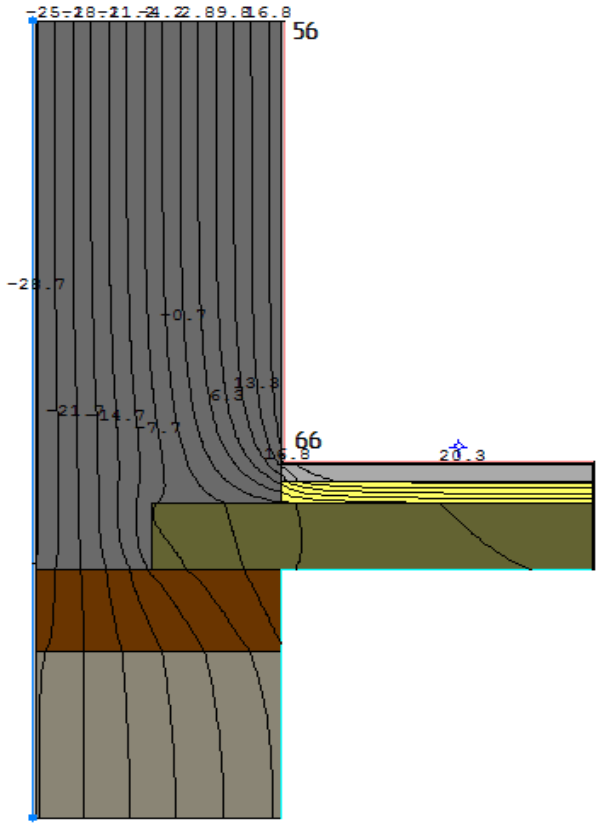


Рисунок Б.6. - Температурное поле в узле III до пола (сечение по наружной стене III-III)

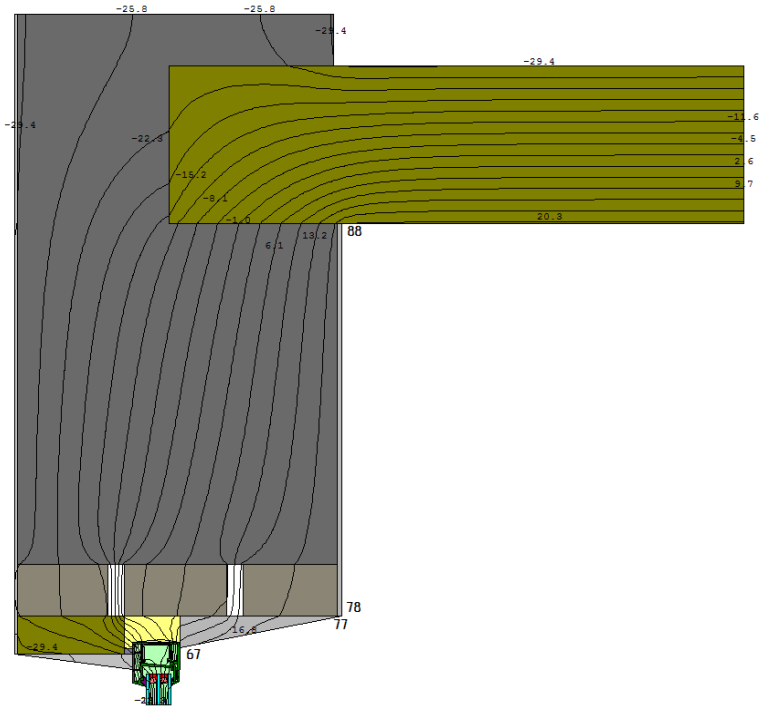


Рисунок Б.7. - Температурное поле в узле IVа (сечение по наружной стене Va – Va)

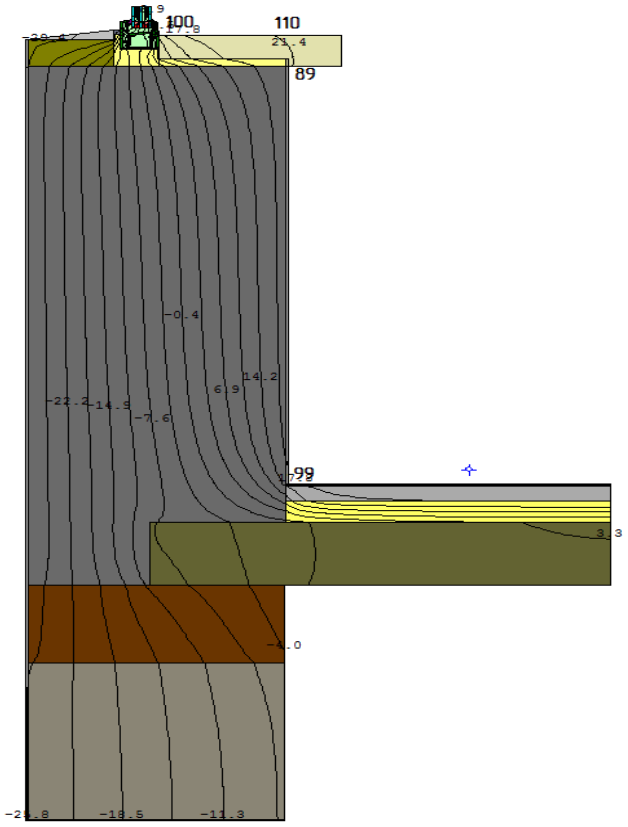


Рисунок Б.8. - Температурное поле в узле IVб (сечение по наружной стене Vб – Vб).

Таблица Б.2. Результаты теплотехнического расчета строительных узлов.

Номер строительного узла	Вид ограждения	Номер точки	Текущая температура поверхностей	Средняя температура i-ой зоны	Площадь i-ой зоны, F_i, м^2	Сопротивление теплопередаче i-ой зоны R_i, м^2 ^{0}С/Вт
1	2	3	4	5	6	7
Узел I	Откос	1	12,3	18,64	0,30	1,78
		2	15,2			
		3	17			
		4	18,2			
		5	18,7			
		6	19,4			
		7	20,1			
		8	20,5			
		9	20,7			
		10	21,3			
		11	21,6			
	Гладь	12	21,6	19,90	1,43	2,85
		13	20,5			
		14	20			
		15	19,8			
		16	19,7			
		17	19,7			
		18	19,7			
		19	19,6			
		20	19,6			
		21	19,6			
		22	19,1			
Узел II	Откос	23	12,3	18,71	0,30	1,82
		24	15,7			
		25	17,3			
		26	17,9			
		27	18,9			
		28	19,5			
		29	20			
		30	20,4			
		31	20,9			
		32	21,4			
		33	21,5			
	Гладь	34	21,5	19,45	1,69	2,35
		35	20,7			
		36	20,1			
		37	19,9			
		38	19,7			
		39	19,7			
		40	19,6			
		41	19,5			
		42	19,2			
		43	18,7			
		44	15,4			
Узел III	Гладь	45	19,6	19,24	1,12	2,20
		46	19,6			
		47	19,6			
		48	19,6			
		49	19,5			
		50	19,5			
		51	19,4			
		52	19,3			
		53	19,1			

Продолжение таблицы Б.2.

	Гладь	54	18,8	19,2	1,78	2,13
		55	18,1			
		56	19,7			
		57	19,7			
		58	19,7			
		59	19,7			
		60	19,6			
		61	19,6			
		62	19,6			
		63	19,5			
		64	19,3			
		65	18,8			
		66	16			
Узел IVа	Откос	67	12,4	16,68	0,26	1,12
		68	13,3			
		69	14			
		70	14,8			
		71	17,3			
		72	18,1			
		73	18,4			
		74	18,6			
		75	18,7			
		76	18,7			
		77	19,2			
	Гладь	78	19,2	19,37	0,60	2,27
		79	18,7			
		80	20,1			
		81	20,1			
		82	19,9			
		83	19,8			
		84	19,6			
		85	19,4			
		86	19,2			
		87	18,9			
		88	18,2			
Узел IVб	Гладь	89	21,2	19,48	0,96	2,37
		90	20,3			
		91	20			
		92	19,8			
		93	19,7			
		94	19,7			
		95	19,6			
		96	19,5			
		97	19,4			
		98	18,8			
		99	16,3			
	Откос	100	14	19,82	0,26	2,74
		101	17,1			
		102	18,1			
		103	19,5			
		104	19,9			
		105	20,3			
		106	20,8			
		107	21			
		108	24,1			
		109	21,5			
		110	21,7			

Дополнительно был выполнен расчет коэффициента теплотехнической однородности фрагмента наружной стены по методике, изложенной в СП 230.1325800.2015 [71].

1. Условное сопротивление теплопередаче однородной части фрагмента наружной стены, (м^2·ºС)/Вт составило:

$$R_0^{усл.} = \frac{1}{\alpha_в} + \sum_{i=1}^{n} \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_н} = \frac{1}{8,7} + \frac{0,0035}{0,7} + \frac{0,4}{0,17} + \frac{0,005}{0,3} + \frac{1}{23} = 2,68 \text{ (м}^2\text{·ºС)/Вт.}$$

2. Коэффициент теплопередаче однородной части фрагмента наружной стены Вт/(м^2·ºС):

$$K = \frac{1}{R_0^{усл.}} = \frac{1}{2,68} = 0,373 \text{ Вт/(м}^2\text{·ºС).}$$

3. Удельные потери теплоты через элементы, входящие в фрагмент наружной стены, Вт/(м·ºС):

- для выпуклого угла кладки $\delta_{кл.} = 0,4$ м, $\lambda = 0,17$ Вт/(м·ºС), $\psi_1 = 0,0806$ Вт/(м·ºС);

- для стыков с оконными блоками $\delta_{кл.} = 0,4$ м, $\lambda = 0,17$ Вт/(м·ºС), $\psi_2 = 0,10$ Вт/(м·ºС);

- для узла примыкания стен к цокольному ограждению $\delta_{кл.} = 0,4$ м, $\lambda = 0,17$ Вт/(м·ºС), $\psi_3 = 0,134$ Вт/(м·ºС).

4. Геометрическая характеристика линейного теплозащитного элемента, м/м²:

- для фрагмента выпуклого угла кладки $l_1 = 0,08$ м/м²;

- для фрагмента стыков с оконными блоками $l_2 = 0,26$ м/м²;

- для фрагмента примыкания стен к цокольному ограждению $l_3 = 0,21$ м/м²;

Учет влияния швов на теплозащитные характеристики кладок из газобетонных блоков осуществляется путем использования эквивалентного коэффициента теплопроводности, полученного экспериментальным путем, представленного в СТО 00044807-001-2006 [72].

Данные расчетов представлены в таблице Б.3 в соответствии с приложением Е СП 50.13330.2012 [69].

Таблица Б.3. Характеристики неоднородностей наружной стены

Элемент конструкции	Удельный геометрический показатель,	Удельные потери теплоты, Вт/(м·ºС)	Удельный тепловой поток, обусловленный элементом, Вт/(м²·ºС)	Доля общего потока теплоты через фрагмент, %
Линейный элемент 1	$l_1 = 0{,}08$ м/м²	$\psi_1 = 0{,}0806$	$\psi_1 \cdot l_1 = 0{,}0064$	1,5
Линейный элемент 2	$l_2 = 0{,}26$ м/м²	$\psi_2 = 0{,}10$	$\psi_2 \cdot l_2 = 0{,}026$	6,1
Линейный элемент 3	$l_3 = 0{,}21$ м/м²	$\psi_3 = 0{,}134$	$\psi_3 \cdot l_3 = 0{,}028$	6,4
Плоский элемент	$a = 1$ м²/м²	$K = 0{,}373$ Вт/(м²·ºС)	$K \cdot a = 0{,}373$	86
Итого			$1/R^{пр} = 0{,}433$	100

5. Приведенное сопротивление теплопередаче наружной стены:

$$R_0^{пр} = \frac{1}{\sum a_i \cdot K_i + \sum l_i \cdot \psi_i} = \frac{1}{0{,}373 + 0{,}0064 + 0{,}026 + 0{,}028} = \frac{1}{0{,}433} = 2{,}32\ (\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})/\text{Вт}$$

6. Коэффициент теплотехнической однородности:

$$r = \frac{R_0^{пр}}{R_0^{усл}} = \frac{2{,}32}{2{,}68} = 0{,}87$$

Значение приведенного сопротивления теплопередаче наружной стены, рассчитанное с помощью программного комплекса THERM 7.6.0 , практически совпадает со значением, полученным по методике, изложенной в СП 230.1325800.2015 [71] ($2{,}34 \approx 2{,}32$), что свидетельствует о высокой точности выполненного расчета.

Приложение В
Протокол испытаний наружной стены в климатической камере

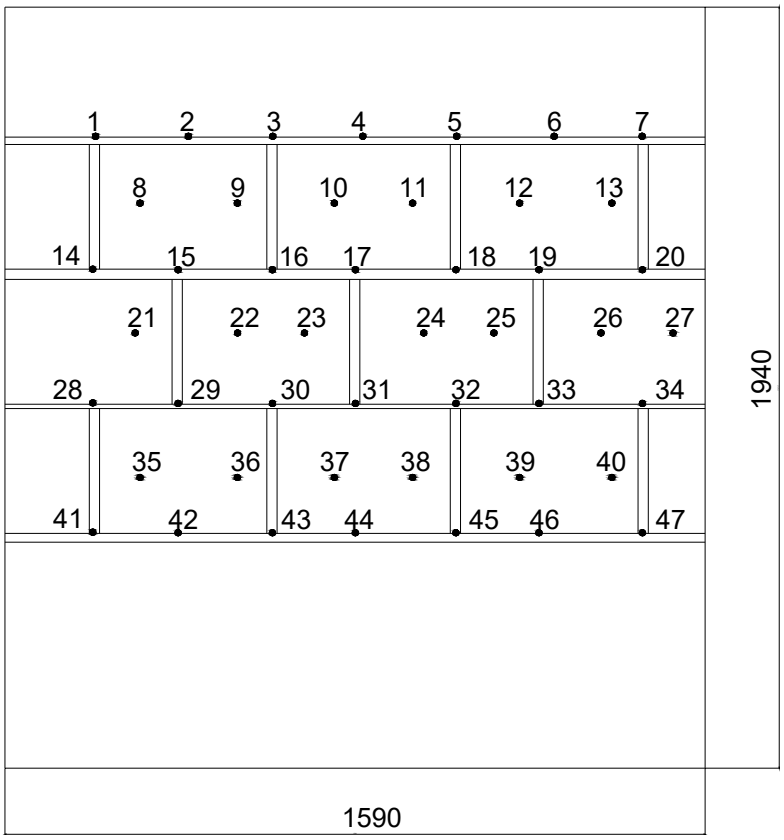


Рисунок В.1. Схема размещения датчиков температур и тепловых потоков на фрагменте стены из пустотелых керамзитобетонных блоков.

Таблица В1. Протокол испытаний ограждений в климатической камере

Номер термически однородной зоны	Площадь i-ой зоны, F_i, м^2	Номер термодатчиков	Текущие значения температур поверхностей		Средняя температура однородной зоны		Номер датчиков тепловых потоков	Текущие значения плотности тепловых потоков	Средняя плотность теплового потока однородной зоны	Текущее значение относительной влажности воздуха, %	Термические сопротивления поверхности		Термическое сопротивление конструкции	Сопротивление теплопередаче
			$\tau_{вi}$	$\tau_{нi}$	$\tau_{вi}$	$\tau_{нi}$					$R_{вi}$	$R_{нi}$	$R_{кi}$	$R_{оi}$
			°C	°C	°C	°C		Вт/м^2	Вт/м^2		(м^2·°C)/Вт			
1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**
I	0,25	1	12,4	-24,3	12,35	-24,25	1	40,0	40,6	52	0,115	0,044	0,901	1,23
		2	12,3	-24,2			2	41,0						
		3	12,3	-24,2			3	41,0						
		4	12,4	-24,3			4	40,0						
		5	12,3	-24,2			5	40,5						
		6	12,4	-24,2			6	40,6						
		7	12,4	-24,2			7	41,0						
		14	12,3	-24,2			14	41,0						
		15	12,3	-24,3			15	40,5						
		16	12,3	-24,2			16	41,0						
		17	12,4	-24,3			17	40,0						
		18	12,4	-24,2			18	40,5						
		19	12,4	-24,3			19	41,0						
		20	12,4	-24,2			20	41,0						
		28	12,3	-24,2			28	40,5						
		29	12,4	-24,3			29	40,0						
		30	12,3	-24,3			30	40,5						
		31	12,3	-24,2			31	40,5						
		32	12,3	-24,2			32	41,0						
		33	12,4	-24,3			33	40,0						
		34	12,3	-24,3			34	41,0						
		41	12,3	-24,2			41	41,0						
		42	12,4	-24,2			42	40,5						
		43	12,4	-24,2			43	40,0						
		44	12,4	-24,3			44	40,5						
		45	12,3	-24,3			45	40,5						
		46	12,3	-24,2			46	41,0						
		47	12,3	-24,2			47	41,0						

Окончание таблицы В1.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
II	0,733	8	13,2	-24,6	13,2	-24,55	8	33,0	33,0	52	0,115	0,044	1,144	
		9	13,1	-24,5			9	33,5						
		10	13,2	-24,6			10	33,0						
		11	13,3	-24,6			11	32,5						
		12	13,2	-24,6			12	33,0						
		13	13,1	-24,5			13	33,5						
		20	13,2	-24,6			20	33,0						
		21	13,3	-24,6			21	32,5						
		22	13,1	-24,5			22	33,5						
		23	13,2	-24,6			23	33,0						
		24	13,2	-24,6			24	33,0						
		25	13,3	-24,5			25	32,5						
		26	13,2	-24,6			26	33,0						
		27	13,1	-24,5			27	33,5						
		35	13,2	-24,5			35	33,0						
		36	13,3	-24,6			36	32,5						
		37	13,2	-24,6			37	33,0						
		38	13,1	-24,5			38	33,5						
		39	13,3	-24,5			39	32,5						
		40	13,2	-24,6			40	33,0						

Тип панели – кладка из пустотелых керамзитобетонных блоков; температура в теплом отделении камеры $t_в$ = 17,0 ºС;
Температура в холодном отделении камеры $t_н$ = -26,0 ºС

Приложение Г
Испытание отопительных приборов

Таблица Г.1. Протокол испытаний алюминиевого радиатора Polo Plus 500.

Polo Plus 500													
Алюминиевый 6 секций													
Данные в помещении													
t в пом. °С	23,7											25,2	24,45
Влажность, %	37,2											37,2	37,2
	0 мин		2 мин	4 мин	6 мин	8мин	10мин	12мин	14мин	16мин	18мин	20мин	Ср. знач
Показания счётчика, л.	В нач.	22904											
	В конц.											22934	
T1	В нач., °С	15	41,5	56	78	76	78,4	77	78	75	78	77	71,49
T2	В конц., °С	15	35,5	43	61	73	72	71	68	66	65	64	61,85
Давление в сети	1,8 Бар												
Тепловой поток Вт/м2	q1		403	578	860	810	898	691	661	579	664	620	676,4
	q2		232	400	666	485	504	420	442	449	440	457	449,5
	q3		183	333	601	508	517	472	436	424	424	432	433

Таблица Г.2. Протокол испытаний биметаллического радиатора

Polo Plus 500													
Биметаллический 6 секции													
Данные в помещении													
t в пом. °С	25,1											27	
Влажность,%	43											43	
	0 мин		2 мин	4 мин	6 мин	8мин	10мин	12мин	14мин	16мин	18мин	20мин	Ср. знач
Показания счётчика,л.	В нач	23082											
	В конц											23110	
t теплоносителя	В нач, °С	15	32	57	76	80	87	90	88	90	89	90	77,9
	В конц, °С	15	17	30	50	75	76	78	80	80	80	81	64,7
Давление в сети	1,8 Бар												
Тепловой поток	q1		263	550	650	520	550	603	580	570	605	593	548,4
	q2		78	406	520	436	490	487	430	415	448	441	413,6
	q3		44	380	500	411	470	492	420	390	415	425	394,7

Таблица Г.3. Протокол испытаний чугунного радиатора

МС-140																							
Чугунный 7 секций																							
Данные в помещении																							
t в пом. °С	24,7																						25,3
Влажность,%	43%																						43
	0 мин		3 мин	6 мин	9 мин	12мин	15мин	18мин	21мин	24мин	27мин	30мин	33 мин.	36	39	42	45	48	51	54	57	60	
Показания счётчика,л.	В нач	23348																					
	В конц																						23437
t теплоносителя	В нач, °С	15	30	64	75	80	85	85	87	87	87	86	87	87	87	86	87	88	86	85	87	87	
	В конц, °С	15	20	24	36	54	66	76	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78	74	78	78	
Давление в сети	1,8 Бар																						
Тепловой поток	q1		33,7	480	403	584	675	779,2	760,6	728,7	745,8	718,1	713,6	709,1	734,6	716,8	710	723,5	714,3	720,7	731	737	
	q2		83,3	405,1	468	522	785	690,6	702,1	712,2	687,7	710,5	709,2	707,6	713	714,4	706,2	704,5	714,1	705,3	713	727	
	q3		40,6	470,9	492	641	657	628,1	613,3	608,1	607,2	610,5	702,7	693,7	691	686,7	704,7	697,8	689,2	697,2	712	715	

Приложение Д
Результаты расчета темпа остывания коттеджа

Таблица Д1. Результаты расчета аккумулирующей способности дома.

$t_н$, °С	$\rho_н$, кг/м³	$G_в$, кг/ч	$Q_{уд.}$, Вт/°С	τ_R, °С	K_t	$C_{огр.}$, кДж/°С	β, ч
0	1,29	75,60	48,83	21	0,954	6507,47	37
-10	1,34	78,55	49,7	20,44	0,951	6487,11	36,25
-20	1,39	81,48	50,46	20,38	0,961	6555,23	36,08
-30	1,45	85	51,44	20,08	0,963	6568,86	35,47

Таблица Д2. Теплоаккумулирующая способность жилого дома при различной кратности вохдухообмена.

$t_н$, °С	Кратность воздухообмена $n, ч^{-1}$	$Q_{уд.}$, Вт/°С	$C_{огр.}$, кДж/°С	β, ч
	0,25	33,08	6507,47	54,64
	0,5	38,33	6507,47	47,16
	0,75	43,58	6507,47	41,48
0	1	48,83	6507,47	37
	0,25	33,28	6487	54,14
	0,5	38,74	6487	46,51
	0,75	44,19	6487	40,77
-10	1	49,7	6487	36,25
	0,25	33,49	6555,2	54,37
	0,5	39,15	6555,2	46,51
	0,75	44,81	6555,2	40,64
-20	1	50,46	6555,2	36,08
	0,25	33,73	6568,86	54,09
	0,5	39,64	6568,86	46,04
	0,75	45,54	6568,86	40,07
-30	1	51,44	6568,86	35,47

Таблица Д3. Результаты расчета процесса охлаждения коттеджа.

Z, ч	Безразмерная температура внутреннего воздуха при значениях β, ч			
	30	40	50	60
0	1	1	1	1
5	0,847434	0,883241628	0,905448	0,920562
10	0,718145	0,780115773	0,819836	0,847434
15	0,608581	0,689030725	0,74232	0,780116
20	0,515732	0,608580619	0,672132	0,718145
25	0,437049	0,537523737	0,608581	0,661097
30	0,37037	0,47476334	0,551038	0,608581

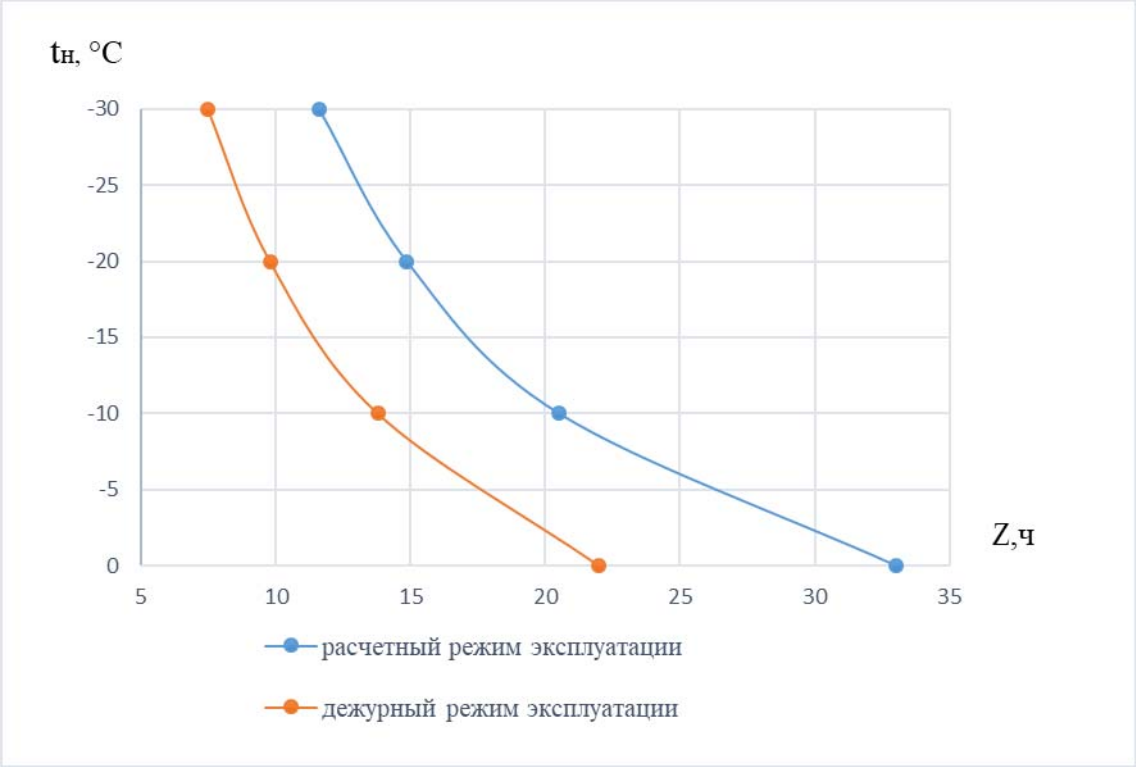


Рисунок Д1. Результаты расчета остывания коттеджа.

Приложение Е
Экспериментальные исследования блоков из беспесчаного керамзитобетона

Таблица Е1. Коэффициент теплопроводности.

Плотность керамзитобетона в сухом состоянии, кг/м³	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м°С)		
	в сухом состоянии	условия эксплуатации А	условия эксплуатации Б
600	0,082	0,097	0,112
700	0,108	0,127	0,147
800	0,113	0,141	0,156

Таблица Е2. Коэффициент паропроницания.

Плотность керамзитобетона в сухом состоянии, кг/м³	Коэффициент паропроницания, мг/(м·ч·Па)
600	0,33
700	0,12
800	0,12

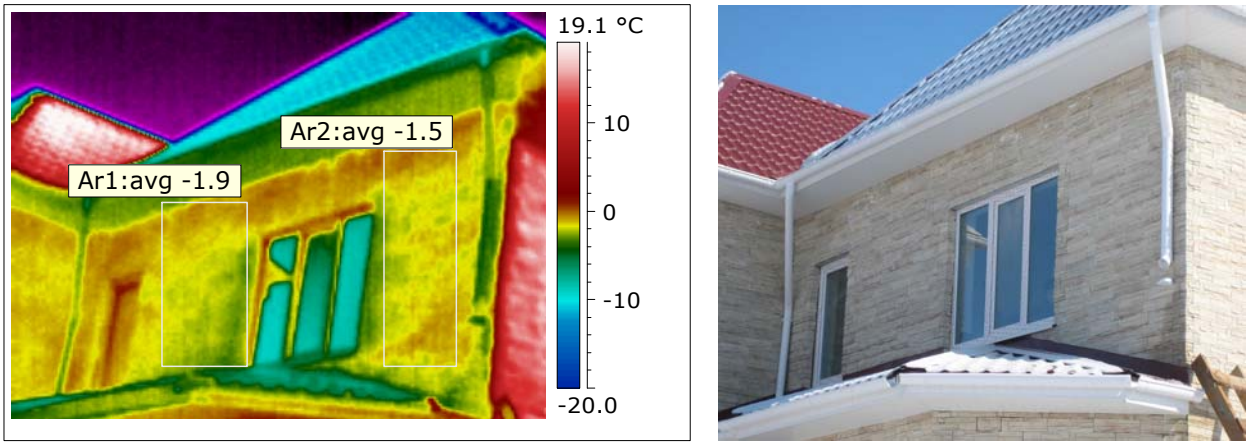
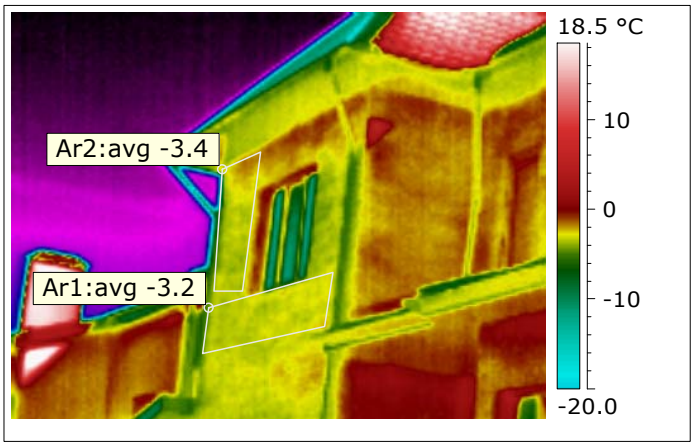
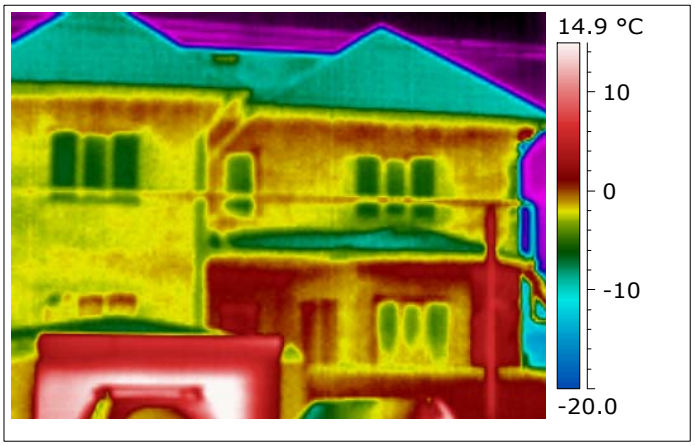


Рисунок Е1. Фрагмент ограждения в инфракрасном и видимом спектрах.



Изображение Дата Изображение Тип камеры ThermaCAM B2 Ar1 Средняя температура -3.2 °C Ar2 Средняя температура -3.4 °C	**Помещение 2, левая стена**

Рисунок Е2. Фрагмент ограждения в инфракрасном и видимом спектрах.



Изображение Дата Изображение Тип камеры ThermaCAM B2	**Фасад, общий вид на помещения второго этажа (1 и 2)**

Рисунок Е3. Фрагмент ограждения в инфракрасном и видимом спектрах.

Приложение Ж
Акты и справки о внедрении

САМАРСКИЙ ПОЛИТЕХ
Опорный университет

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Самарский государственный технический университет»
(ФГБОУ ВО «СамГТУ»)

Утверждаю

Проректор по учебной работе СамГТУ

_____ О.В.Юсупова

«___» _____ 2019 г.

СПРАВКА

О внедрении в учебном процессе результатов диссертационного исследования А.А. Чулкова «Повышение энергетической эффективности зданий, эксплуатируемых в условиях переменного теплового режима».

С участием А.А. Чулкова подготовлено и издано учебное пособие «Нестационарная теплопередача в зданиях и сооружениях». - Самара: Сам. гос. техн. ун-т, 2018. - 86 с.

Указанное пособие используется в учебном процессе по курсу «Физика среды и ограждающих конструкций» для студентов, обучающихся по направлению «Строительство».

Разработчик _____ А.А. Чулков

Зав.каф.ТГВ, к.т.н., доц. _____ Д.В. Зеленцов

Начальник учебного управления _____ Е.А. Алонцева

Архитектурно-строительная компания
ТЕХНОСТРОЙ
domik-63.ru
+7 (846) 991-76-47

14 февраля 2019г.

СПРАВКА

О практическом использовании результатов диссертационной работы А.А. Чулкова «Повышение энергетической эффективности зданий, эксплуатируемых в условиях переменного теплового режима».

Разработанные методики теплотехнических расчетов ограждающих конструкций и элементов систем отопления аспиранта А.А. Чулкова и к.т.н., проф. Вытчикова Ю.С. использованы ООО “АСК ТЕХНОСТРОЙ” при проектировании и строительстве индивидуальных жилых домов на территории РФ и республики Казахстан.

Данные методики позволяют спроектировать индивидуальные жилые дома с минимальным временем нагрева помещений и с наименьшими энергозатратами на натоп.

Расчетный экономический эффект от применения прерывистой системы отопления для коттеджного поселка на 40 жилых домов составил 254 720,47 рублей.

Директор ООО “АСК ТЕХНОСТРОЙ” **Тюгаев С.А.**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 178409

ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОЕ ИЗДЕЛИЕ ИЗ ПЕНОПОЛИУРЕТАНА

Патентообладатель: ***Чулков Александр Анатольевич (RU)***

Авторы: ***Чулков Александр Анатольевич (RU), Вытчиков Юрий Серафимович (RU), Кауров Иван Владимирович (RU)***

Заявка № **2016145851**
Приоритет полезной модели **22 ноября 2016 г.**
Дата государственной регистрации в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации **03 апреля 2018 г.**
Срок действия исключительного права на полезную модель истекает **22 ноября 2026 г.**

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев