

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Воронежский государственный технический
университет»

На правах рукописи



Шепс Роман Александрович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ
НАРУЖНЫХ ОГРАЖДЕНИЙ ЗДАНИЙ НА ОСНОВЕ
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ**

Специальность 05.23.03 - Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование
воздуха, газоснабжение и освещение

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель –
кандидат технических наук,
доцент Т.В. Щукина

Воронеж 2019

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
Глава 1. Повышение энергоэффективности зданий посредством конструирования ограждающих конструкций нового поколения	9
1.1. Влияние условий эксплуатации зданий на энергоэффективность наружных ограждений	9
1.2. Обзор современных технических решений по использованию солнечного излучения	20
1.3 Предпосылки к использованию солнечной энергии	21
1.4. Устройства, утилизирующие солнечную энергию	23
1.5. Оценка теплоаккумулирующих свойств строительных материалов ограждающих конструкций	26
1.6. Выводы по первой главе	33
Глава 2. Тепловые волны в пассивной многослойной солнечной панели	35
2.1. Физические основы природы тепловых волн	35
2.2. Основные уравнения и метод температурных волн	38
2.3. Метод расчета переноса тепла в многослойной конструкции	45
2.4. Расчет переноса тепла в четырехслойной конструкции	52
Выводы по 2 главе	58
Глава 3. Экспериментальное исследование стеновой солнечной панели	60
3.1. Методика проведения экспериментальных исследований	61
3.2. Приборы и средства измерений	64
3.3. Устройство экспериментальной модели здания	67
3.4. Планирование эксперимента	74
3.5. Результаты проведения экспериментальных исследований	75
3.6. Оценка достоверности полученных данных	79
3.7. Разработка энергоэффективных наружных ограждений	80
3.8. Анализ разработанной наружной ограждающей конструкции	84
для различных климатических зон	84
Выводы по 3 главе	87
Глава 4. Оценка экономической эффективности внедрения технологии утилизации солнечного излучения энергоактивными наружными ограждениями	88

4.1. Обоснование необходимости оценки экономической эффективности внедрения новой технологии утилизации солнечной энергии	88
4.2. Обоснование применения современной сметно-нормативной базы при определении стоимости строительно-монтажных и ремонтно-строительных работ в целях определения экономической эффективности внедрения новой технологии	90
4.3. Сравнение стоимости возведения конструкции на основе применения существующих сметных нормативов	96
4.4. Сравнение стоимости технического содержания и эксплуатационных затрат (ремонта конструкций) на основе применения существующих сметных нормативов.....	99
4.5. Оценка стоимости сокращения затрат на отопление помещения за счет утилизации солнечного излучения – экономический эффект от повышения энергоэффективности	101
4.6. Расчет экономической эффективности внедрения стеновых солнечных панелей	103
Заключение.....	105
Список литературы	107
Приложение А. Решение линейной системы алгебраических уравнений.....	117
Приложение Б. Расчет констант при переносе тепла в однородном слое	118
Приложение В. Расчет комплексных амплитуд колебания с нелинейным режимом затухания.....	119
Приложение Г. Решение задачи теплопроводности четырехслойной панели с переменной внешней температурой	123
Приложение Д. Нахождение постоянных коэффициентов для расчета распределения температур	128
Приложение Е. Локальный сметный расчет	131
Приложение Ж. Патент на изобретение	150
Приложение З. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ	151
Приложение И. Материалы по использованию результатов работы	152

Введение

Проблеме экономии топливно-энергетических ресурсов уделяется большое внимание во всем мире. В связи с этим особое значение приобретает внедрение энергосберегающих технологий, обеспечивающих снижение энергопотребления и позволяющих существенно экономить традиционные виды топлива. В экономике Российской Федерации отрасль энергетики и строительства является одной из ведущих. Важной для развития энергетики и строительства в настоящее время является необходимость существенного повышения эффективности преобразования и использования альтернативных источников энергии. Одна из наиболее важных задач этого направления - развитие нетрадиционной и автономной энергетики, а также энергетики возобновляемых источников. Расширение возможностей нетрадиционной энергетики позволяет решать вопросы снижения удельного потребления энергии зданиями различного назначения. Примером являются многочисленные районы в странах Евросоюза и отдельные здания, построенные в г. Москва, Московской области и южных регионах России.

Степень разработанности. Диссертационное исследование базируется на фундаментальных и современных теоретических и практических исследованиях, связанных с вопросами, посвященными созданию пассивных ограждающих конструкций для повышения энергетической эффективности зданий различного назначения. Среди отечественных ученых широко известны работы В.Н. Богословского, В.И. Бодрова, В.Г. Гагарина, Т.А. Дацюка, Е.Г. Малявиной, К.Ф. Фокина, А.Д. Самарина, А.У. Франчука. Следует также уделить внимание ряду современных российских ученых, которые исследуют перспективы развития альтернативной энергетики: Н.Д. Шишкин, О.Г. Лушников, Н.А. Соболенко, М.Г. Тягунов. Среди зарубежных авторов наиболее интересными, основательными и цитируемыми являются работы Дж. Даффи и У. Бекмана, а также Дж. Твайделл, А. Уэйр, Б. Андерсон, С. Зоколей, Р. Суда.

Несмотря на значительное количество опубликованных работ, посвященных вопросам теплопередачи в ограждающих конструкциях, а также альтернативным источникам энергии (в частности солнечной энергетике), на данный момент отсутствуют достаточные теоретические и практические сведения по конструированию пассивных ограждающих конструкций на основе аккумулирования солнечной энергии на территории Российской Федерации.

Целью диссертационной работы является разработка методов расчета и конструирования энергоэффективных наружных ограждений, снижающих потребление энергоресурсов при эксплуатации зданий.

Поставленная цель определяет следующие задачи исследования:

1. Выполнить анализ существующих способов повышения поглощения солнечной энергии наружными ограждениями и методов расчета многослойных панелей при изменяющихся тепловых потоках.
2. Разработать математическую модель и провести численные исследования тепловых режимов наружных ограждений, в которых, в отличие от известных ранее, учитываются поглощающие и теплоаккумулирующие свойства строительных материалов при воздействии солнечного излучения.
3. Предложить конструктивное решение ограждения здания с теплоаккумулирующим слоем, обеспечивающее утилизацию солнечного излучения при требуемых параметрах тепловой защиты для различных климатических зон.
4. Выполнить экспериментальные исследования тепловых режимов нового энергоэффективного наружного ограждения.
5. Определить экономическую целесообразность строительства и эксплуатации зданий с применением энергоэффективных наружных ограждений.

Научная новизна заключается в следующем:

- Предложена на основе комплекса теоретических и экспериментальных исследований математическая модель определения теплового потока через многослойное наружное ограждение в нестационарных условиях, обусловленных воздействием солнечной энергии на аккумулирующий материал.
- Получены аналитические зависимости изменения температуры и теплового потока для энергоэффективных наружных ограждений по времени.
- Выявлены закономерности влияния солнечного излучения на тепловой режим энергоэффективных наружных ограждений.
- Получены оптимальные параметры энергоэффективных наружных ограждений, обеспечивающих поступление теплового потока в помещение.

Теоретическая значимость работы заключается в получении новых расчетных формул для определения температурных режимов и тепловых потоков при суточных изменениях актинометрических показателей, используемых в методике расчета солнечных фасадов. Полученные выражения позволяют рассчитать энергоэффективные наружные ограждения с утилизацией солнечного излучения для снижения потребления зданиями традиционных ресурсов в отопительный период.

Практическая значимость работы заключается в разработке метода расчета и компьютерной программы, позволяющих производить численное моделирование тепловых процессов в многослойных наружных ограждениях. Разработано энергоэффективное наружное ограждение (патент № 2604119). На основе результатов численных и экспериментальных исследований предложено конструктивное решение солнечной стеновой панели для применения в I, II, III климатических зонах РФ. Определены зоны экономической целесообразности пассивной утилизации солнечной энергии для климатических условий РФ. Расчетный годовой экономический эффект от внедрения интегрированных в фасады солнечных стеновых панелей в Центрально-Черноземном регионе составляет 54 тыс. руб. на 100 м² в ценах 2018 года.

Результаты диссертационного исследования использованы при проектировании и строительстве административно-производственного здания в г. Воронеж. «Программа расчета температуры в 4-х слойной конструкции с переменным тепловым потоком» зарегистрирована в объединенном фонде электронных ресурсов «Наука и образование».

Методология и методы исследования базируются на сочетании теоретического и экспериментального подходов, основанных на анализе исследований отечественных и зарубежных ученых в области строительной теплофизики и солнечной энергетики. На основе классической и прикладной теории теплопроводности и теплообмена выполнено математическое моделирование процессов в энергоэффективных наружных ограждениях. Для изучения процесса утилизации солнечного излучения проводились экспериментальные исследования в реальных условиях. При получении и обработке экспериментальных данных использовались методы обобщения, а также системного анализа теоретических и эмпирических результатов.

Достоверность научных выводов, положений и рекомендаций подтверждается результатами практических исследований и математического моделирования, адекватность которых доказана основополагающей теорией теплопередачи и достоверным объемом исходной информации.

На защиту выносятся:

- Системный подход при оценке возможности пассивной утилизации солнечной энергии в различных климатических зонах РФ.
- Параметры энергоактивных ограждений, полученные на основе результатов математического моделирования их теплоаккумулирующей способности.
- Влияние интегрированных фасадных элементов утилизации солнечной энергии на энергоэффективную эксплуатацию зданий.
- Конструктивные решения проектирования ограждений с теплоаккумулирующим слоем, подвергаемом солнечному облучению.
- Результаты технико-экономической оценки энергоэффективности ограждений, пассивно утилизующих солнечное излучение.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы были рассмотрены и обсуждены на научно-практических конференциях профессорско-преподавательского состава ВГТУ (Воронежского ГАСУ) (Воронеж, 2013-2018г.г.); Scientific Review. Proceedings of the international scientific conference, Czech Republic (Karlovy Vary-Russia, Moscow, 29-30 May 2015); Теоретические основы теплогазоснабжения и вентиляции: сборник докладов VI (НИУ МГСУ 25-27 ноября 2015 г.).

Глава 1. Повышение энергоэффективности зданий посредством конструирования ограждающих конструкций нового поколения

1.1. Влияние условий эксплуатации зданий на энергоэффективность наружных ограждений

Вопрос повышения энергоэффективности зданий в течение последнего десятилетия является одним из приоритетных в развитии народного хозяйства РФ. Вплоть до 2007 года уровень тарифов на энергоресурсы являлся причиной сдерживания процесса переориентирования рынка на внедрение энергоэффективного оборудования, устройств и технологий. Но в течение нескольких лет заметно возросли внутренние тарифы на энергоресурсы: на электроэнергию рост тарифов составил более 45%, на газ цены возросли более чем на 60%. В сфере ЖКХ в числе первых почувствовали ощутимые изменения в уровне цен, поскольку именно здесь расходуется до 20% объема электрической и до 45% всей тепловой энергии, производимой в РФ.

Постоянно возрастающий объем расходования энергоресурсов свидетельствует о высоком уровне потерь данных ресурсов. Так, из общего объема вырабатываемого тепла до 70% не доходит до потребителя, в том числе при передаче тепла теряется 40%, а потери тепла в зданиях составляют до 30%.

Основным потребителем топливно-энергетических ресурсов является население, т.е. жилищно-коммунальный комплекс, на долю которого приходится 40% суммарного потребления. Промышленностью расходуется 30...35% энергоресурсов. Транспортный сектор, административные учреждения и бюджетная сфера суммарно потребляют менее 10% энергоресурсов [1].

Приведенная статистика показывает, что именно здания жилого, коммерческого и общественного назначения обладают наибольшим потенциалом в повышении эффективности потребления энергии. Рассматривая данную проблему в целом по РФ видно, что на здания расходуется более трети из общего объема вырабатываемой энергии.

Путем внедрения мероприятий, направленных на сокращение потребления тепловой энергии, расходуемой на отопление и горячее водоснабжение, можно достичь до 60% экономии энергии.

Согласно оценкам Всемирного банка реконструкции и развития, потенциал энергосбережения жилых зданий составляет примерно 49%. Системы для отопления и подогрева воды являются определяющими сегментами энергосбережения – они имеют более 70% от возможного потенциала. Проведение модернизации действующего жилого фонда будет способствовать снижению энергоемкости до уровня 151 (кВт•ч/м²)/год, а при условии внедрения решений организационно-технического характера этот уровень может быть и ниже [2].

Один из существенных аспектов энергоэффективности заключается в повышении уровня качества проектных решений для вновь возводимых зданий, а также зданий, подлежащих реконструкции и капитальному ремонту, с учетом внедрения мероприятий, связанных со снижением энергопотребления и затрат на эксплуатацию. Анализ эксплуатационных расходов (рисунок 1.1) позволяет прийти к выводу, что не менее 50% от общей суммы расходов в течение всего жизненного цикла здания приходится на затраты, связанные с эксплуатацией здания.



Рисунок 1.1. Распределение затрат на протяжении жизненного цикла здания

Внедрение новых решений в области архитектуры и проектных разработок требуют появления новых технических предложений в сфере систем жизнеобеспечения жилых зданий. Они должны не только обеспечивать требуемый уровень комфорта, но определять качественные показатели воздушной среды и уровень энергоэффективности жилых зданий [3].

Повсеместное динамичное использование окон и дверей современных конструкций, обладающих повышенной герметичностью, является причиной того, что вентиляция квартир, которая при разработках проектов была рассчитана на инфильтрацию воздуха посредством неплотностей в проемах, практически не выполняет своих функций.

Подобным образом был нарушен порядок приточной вентиляции, разрабатываемый в постсоветской системе, что приводит к невыполнению нормативных требований в части соблюдения кратности воздухообмена. Это, в свою очередь, ухудшает качество воздуха, увеличивает влажность в помещениях здания, образует патогенную флору в виде грибков и плесени, увеличивает уровень влажности внутри ограждающих конструкций, а также снижает их фактическое сопротивление теплопередаче.

При этом происходит усугубление ситуации, когда по причине дефицита приточного воздуха жильцы вынуждены систематически производить открывание окон и форточек. Эти действия приводят к бесконтрольному выветриванию тепла, «обогреву улицы», что в итоге увеличивает затраты на отопление в масштабе всей страны и каждого дома.

Без решения вопросов по устройству приточной вентиляции во вновь построенных зданиях потери от выветривания тепла могут привести к ежегодному перерасходу энергоресурсов в больших количествах, а уровень эффективности выполняемой тепловой модернизации заметно снизится. Рассматривая структуру потерь тепловой энергии видно, что более 50% потерь следует отнести именно на систему вентиляции (рисунок. 1.2). При этом не проводится утилизирование тепловой энергии, которая выделяется в результате жизнедеятельности человека и не применяются системы, в основе которых

заложено использование возобновляемых источников энергии, предназначенных для энергообеспечения зданий.

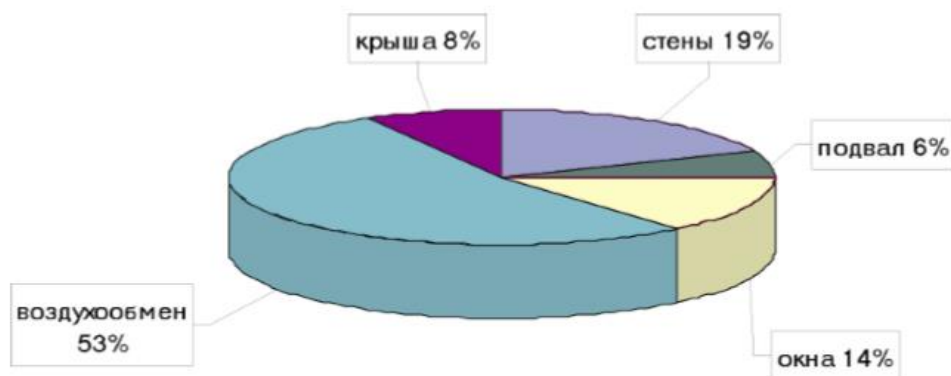


Рисунок 1.2. Распределение потерь тепла в здании

При разработке проектов энергоэффективных и энергоактивных зданий, носящих экологический характер, здание рассматривается как объект, имеющий тесную взаимосвязь с окружающей средой. Логика явлений природы выдвигает приоритетные цели, заключающиеся в постановке энергетических задач, используя целенаправленное формирование особой материальной и пространственной среды, которая обеспечивает регулируемое, но естественное течение требуемых энергетических процессов: здание, конструкции и пространство, т. е. объекты окружающей среды могут выполнять функции энергетической установки. Поэтому задачи, связанные с организацией проведения обменных процессов внутри здания и во внешней среде, в т.ч. используя энергию природной среды, приобретают преимущественное значение.

Подобные задачи решаются, главным образом, ландшафтными градостроительными, объемно-планировочными и конструктивными или пассивными способами. Технические системы, используемые при этом, выполняют простые вспомогательные функции, в основном корректирующего значения: строительство пассивных систем позволяет снизить потребность зданий в энергетических ресурсах наполовину.

Простота эксплуатации, сравнительно невысокая стоимость и экологичность определяют целесообразность их использования в процессе

проектирования различных объектов архитектуры. Помимо этого, во многих программах по энергосбережению в строительстве, проводимых в конце 1980-х годов, у пассивных энергосистем был зафиксирован более высокий уровень экономической эффективности по отношению к большинству активных: определяющим фактором является качество стоимостного и эксплуатационного характера [4,5].

Таким образом, проведение мероприятий, связанных с оптимизацией энергопотребления, энергосбережением и энергоэффективностью, целесообразно внедрять на этапе разработки проектной документации.

При проведении данных работ основными тенденциями являются:

- оптимизирование систем генерации и снабжения топливными ресурсами;
- оптимизирование функций инженерных систем здания;
- оптимизирование конструктивных решений и эффективных ограждающих конструкций.

При комплексном внедрении данных мероприятий имеется возможность добиться сокращения затрат на эксплуатацию на 30–50%, при этом удорожание сметной стоимости строительных работ составит в среднем 10–15%. Таким образом, процесс достижения энергоэффективности в зданиях имеет синергетический характер и обладает отложенным по времени эффектом, т.к. формирование затрат происходит на этапе проектирования и строительства, а реализация - на этапе эксплуатации.

Другим существенным фактором, оказывающим влияние на оценку потенциала энергосбережения и энергоэффективности, является показатель динамики потерь конструкциями ограждения свойств сопротивления теплопередачи, возникающих в результате воздействия климатических нагрузок, а также от недостаточно квалифицированного техобслуживания и эксплуатации.

Проблема является весьма значительной и трудно преодолимой, т. е. по различным причинам субъективного и объективного характера сопротивление теплопередаче путем устройства многослойных ограждающих конструкций

меняется по истечении определенного времени эксплуатации, причем фактические теплотери могут возрастать существенным образом.

В сфере регулирования тепловой защиты на территории РФ действуют два основных документа:

- СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий» [6,42];
- Проект СП «Правила расчета приведенного сопротивления теплопередачи». [7]

В этих документах раскрыты и объяснены основные термины и определения, указаны предельные условия для соблюдения основных зависимостей, а также размещен расчет приведенного сопротивления теплопередачи. Но, с другой стороны, недостает таких понятий, как определение тепловых мостов и изменение уровня коэффициентов теплопередачи в зависимости от старения, температуры и влажности.

Нормативными документами в зарубежных странах: ISO 10211, ISO 14683, DIN 4108 учтены все вышеуказанные показатели и характеристики, а также приведены рекомендации и методики по 2D и 3D моделированию.

В практике европейского и мирового уровня выполнение прогнозирования температурно-влажностного режима для проектируемых ограждений производится, руководствуясь несколькими стандартами. Ими регламентируются как последовательность порядка расчета, так и методика определения необходимых характеристик строительных материалов. Законом РФ № 184 «О техническом регулировании» предусматривается порядок развития нормативной базы согласно апробированным в течение продолжительного времени международным стандартам, что находит отражение в актуализации действующих правил.

Согласно стандартам EN (ISO) показатель расчетного коэффициента теплопроводности для строительных материалов на первом этапе определяется путем инструментальных измерений [8,9]. Затем расчетным путем определяется влияние температуры, влажности и старения, совокупность которых приводит к

изменению теплоизоляционных свойств наружных ограждений в течении срока эксплуатации зданий.

Методикой можно определить расчетные коэффициенты теплопроводности и термические сопротивления конструктивных слоев ограждающих конструкций, а также предполагается применение следующих зависимостей [10]

$$\lambda_2 = \lambda_1 F_T F_m F_a, \quad (1.1)$$

$$R_2 = \frac{R_1}{F_T F_m F_a}, \quad (1.2)$$

где λ_1, λ_2 – коэффициенты теплопроводности, соответственно, которые подлежат определению по результатам испытаний при стандартных условиях EN 10456 [8] и учитывая заданные значения влажности и температуры для рассматриваемого материала, Вт/(м·°C); R_1, R_2 – термические сопротивления слоя материала при стандартных условиях испытаний и в случае прогнозирования тепловлажностного режима эксплуатации, а также с учетом дальнейшего старения, (м²·°C)/Вт; F_T, F_m, F_a – безразмерные поправочные коэффициенты, которые учитывают влияние температуры, влажности на теплозащитные качества строительных материалов с учетом последующего старения.

Безразмерные коэффициенты согласно, [8] рекомендуется определять по экспоненциальным зависимостям

$$F_m = e^{f_u(u_2 - u_1)}, \quad (1.3)$$

$$F_m = e^{f_\psi(\psi_2 - \psi_1)}, \quad (1.4)$$

$$F_t = e^{f_T(T_2 - T_1)}, \quad (1.5)$$

где u_1, ψ_1 – уровень содержания влаги в материале, исходя из условий экспериментального определения коэффициентов теплопроводности, по массе кг/кг и по объему, м³/м³; например, в сухом состоянии $u_1=0, \psi_1 = 0$; u_2, ψ_2 – уровень содержания влаги в материале, исходя из расчетных условий эксплуатации, соответственно, по массе и по объему; T_1 и T_2 – начальная и конечная температуры, исходя из условий эксплуатации; f_u, f_ψ, f_T –

коэффициенты, указанные для конкретных видов материалов и приведенные в справочных данных EN 10456 [8].

Довольно часто экспоненциальные зависимости описывают процесс изменения физических параметров, поэтому предлагаемый вариант подхода позволяет с полным основанием применять его на практике.

Однако в классической теории теплопроводности доказывается линейная пропорциональность температуре материала в виде применения такого уравнения [11]

$$\lambda_t = \lambda_{t_0}(1 + \beta_t t), \quad (1.6)$$

где λ_{t_0} – коэффициент теплопроводности сухого материала при температуре 0 °С, Вт/(м²·°С); t – температура, °С; β – коэффициент пропорциональности.

В работе [12] приведены значения коэффициента пропорциональности β , который является обобщенным для строительных материалов и равным 0,0025.

Франчуком А.У. [12] было предложено наиболее обоснованно проводить учет влияния влажности строительных материалов. В результате проведенных экспериментальных исследований были выявлены закономерности в изменениях значений коэффициентов теплопроводности в случае постепенного увлажнения строительных материалов.

К примеру, свойства тепловой изоляции, имеющей показатели, приведенные в таблице 1.1, являются наиболее адекватными для аппроксимации коэффициентов теплопроводности.

В работе [13] приведена обобщенная формула определения коэффициента теплопроводности:

$$\lambda_\omega = \lambda_{\omega_0} + \Delta\lambda\omega, \quad (1.7)$$

где λ_{ω_0} – коэффициент теплопроводности материала при начальном сухом состоянии, Вт/(м²·°С); $\Delta\lambda$ – градиент изменения теплопроводности в случае увлажнения строительного изделия; в преобладающем большинстве случаев принимается $\Delta\lambda = 0,0062$ [14]; ω – относительная влажность материала, %.

Таблица 1.1

Коэффициент теплопроводности с учетом влажности теплоизоляционных материалов

Относительная влажность материала, %	Теплопроводность, Вт/(м·°С), бетонов			
	Шлаковая вата, кг/м ³		Стеклянная вата, кг/м ³	
	400	200	200	150
0	0,076	0,047	0,047	0,041
2	0,084	0,051	0,052	0,047
5	0,094	0,058	0,060	0,055
10	0,110	0,070	0,074	0,067
15	0,120	0,081	0,087	0,080
20	0,140	0,093	0,101	0,093
25	0,154	0,105	0,114	0,105
30	0,167	0,116	0,128	0,116

Полученные результаты расчетов, в соответствии с зависимостью 1.7, не дают достаточную точность, особенно если это касается класса теплоизоляционных материалов.

Поэтому использование общепринятого подхода к решению задач по установлению тепловлажностных режимов целесообразно выполнять при прогнозировании изменения теплопроводности, выражающейся в линейной пропорциональности вида:

$$\lambda_{\omega} = \lambda_{\omega_0} (1 + \beta_{\omega} \cdot \omega), \quad (1.8)$$

где β_{ω} – коэффициент пропорциональности.

Проводя систематизацию экспериментальных данных [14] по категориям теплотехнических свойств, имеется возможность установить, что, для обладающих несущей способностью строительных материалов, коэффициент пропорциональности $\beta_{\omega}=2$, а для слоев с теплоизоляционными свойствами $\beta_{\omega}=6$.

Для примера рассмотрим стекловату, у которой зависимость (1.8) имеет вид:

с учетом плотности 200 кг/м^3

$$\lambda_{\omega}=0,047(1+5,74\omega), \quad (1.9)$$

с учетом плотности 150 кг/м^3

$$\lambda=0,041(1+6,1 \omega), \quad (1.10)$$

Учитывая зависимости (1.6, 1.8), которые определяют коэффициенты теплопроводности, воздействие срока эксплуатации возможно аппроксимировать выражением, имеющим вид

$$\lambda_{\tau} = \lambda_{\tau_0}(1 + \beta_{\tau} \cdot \tau), \quad (1.11)$$

где λ_{τ_0} – величина коэффициента теплопроводности в первый год эксплуатации, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; β_{τ} – коэффициент пропорциональности; τ – срок эксплуатации, год.

Тогда для определения коэффициентов теплопроводности строительных материалов в условиях действительных тепловлажностных режимов, которые возникают в конкретно взятых климатических зонах, по окончании длительного срока после завершения строительных работ, можно использовать обобщенную зависимость

$$\lambda = \lambda_0(1 + \beta_t \cdot t)(1 + \beta_{\omega} \cdot \omega)(1 + \beta_{\tau} \cdot \tau), \quad (1.12)$$

где λ_0 – показатель коэффициента теплопроводности сухого материала при температуре 0°C в течение первого года эксплуатации, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$.

Часто возникающее изменение структуры материалов, вызванное процессом старения, оказывает незначительное влияние на теплопроводность, тогда в выражении (1.12) этот фактор можно не учитывать.

С учетом рекомендуемых значений β_t и β_{ω} , можно прийти к заключению, что определяющее влияние на уровень варьирования коэффициента теплопроводности оказывает процесс увлажнения материалов.

Это обстоятельство при эксплуатации может привести к значительному увеличению теплотерь наружных ограждений, ухудшению санитарно-гигиенических условий в помещениях. Поэтому в первоначально выполненный

теплотехнический расчет при проектировании необходимо включать варианты прогнозирования вероятных режимов влажности строительных конструкций и оценивать изменение свойств теплозащиты в период эксплуатации согласно с предложенными зависимостями.

Основные принципы проектирования энергоэффективных сооружений заключаются в следующем [15,16,17]:

- 1) требуется выбрать форму здания, учитывая фактор энергосбережения, и правильное ориентирование относительно солнца;
- 2) необходимо достичь высокой степени энергетической эффективности наружного ограждения здания, т.е. согласованности между конструктивными решениями и инженерными системами;
- 3) следует применять теплоизоляцию с наиболее низкими коэффициентами теплопроводности, при проектировании избегать «мостиков холода»;
- 4) широко использовать комплекс энергоэффективных инженерных и технических решений;
- 5) решать вопросы оптимального воздухообмена для достижения необходимых параметров микроклимата;
- 6) использовать возобновляемые и вторичные источники энергии, в том числе солнечную радиацию, как повсеместно доступную, например, при отоплении путем непосредственного нагрева теплоносителя или выработки электрической энергии;
- 7) осуществлять взаимоувязку альтернативных источников энергии с традиционными инженерными системами;
- 8) при проектировании здания учитывать ландшафт, розу ветров и окружающую застройку.

При выполнении проектов зданий, использующих энергию природной среды, следует уделять особое внимание выбору способов и средств для эффективного управления энергетическими потоками воздуха, тепла, света и др. Основной целью при этом является поддержание оптимальных параметров

микроклимата помещений в условиях циклического (сутки, сезон) и периодического (облачность, осадки) изменения показателей внешней среды [18]. При использовании солнечной энергии основополагающими являются следующие задачи:

1. Организация эффективного теплосъема интегрированных солнечных систем с учетом действительной степени рассеянности радиации во внешней среде и требуемой оптимизацией нагрузок на традиционные источники.
2. Обеспечение длительного хранения собранной энергии для компенсации характерного несовпадения во времени периодов поступления и потребления энергии.
3. Автоматическое регулирование потоков распределения энергии в здании для систем и элементов, выполняющих функционально-технологические и микроклиматические функции.

1.2. Обзор современных технических решений по использованию солнечного излучения

В настоящее время известен ряд решений по использованию солнечного излучения. "Солнечные трубы" - представляют собой вертикальные пространства, размещенные по всей высоте здания. Через них может быть осуществлено в зимний период внутреннее воздушное отопление, а летом выполняется качественное проветривание всех основных помещений, благодаря применению естественной вертикальной тяги [19].

Комбинированные системы (как пример - стена-витраж), позволяющие обеспечивать нагревание внутренних элементов помещения, выполняются в виде термостойкостей. Их применение в определенных климатических условиях дает возможность получить до 17% необходимой энергии [20].

Стена Тромба, провоцирующая "парниковый эффект", образующийся в неширокой (до 16 см) прослойке воздуха между светопрозрачной наружной поверхностью и термостойкой стеной, применяется в качестве воздушного

отопления и дополнительного проветривания в теплый период года. Такая конструкция наружного ограждения позволяет экономить до 55% энергии.

Остекленные атриумы представляют собой объединение пассивных средств использования энергии солнечного света. Энергетическая структура атриума, которая соединяет в себе свойства термостатических, буферного пространства, "солнечной трубы" и даже световода, является основным инструментом по регулированию параметров микроклимата здания. В правильно спроектированном и организованном помещении поддерживается качественная вентиляция, температурный режим и естественное освещение, что снижает теплопотери до 50-65% [21].

1.3. Предпосылки к использованию солнечной энергии

Если не учитывать наличие атмосферы на рельеф земной поверхности поступает 1400 Вт энергии на один квадратный метр. Данное значение называется солнечной постоянной. Она зависит от активности Солнца, но не глобально. При ясном небе верхние слои атмосферы рассеивают около 20% солнечного излучения, 80% достигает поверхности Земли. Средняя величина достижения земной поверхности солнечным излучением равна 52% в виду действительной облачности. Суммарно на земную поверхность поступает 800 триллионов мегаватт часов солнечной энергии, что в восемь тысяч раз больше всей энергии, вырабатываемой в мире [22].

Величина солнечной радиации может определяться за год, месяц, сутки на единицу поверхности. Определяющим фактором служит широта и долгота расположения объекта строительства, а также региональные погодные условия и тип климата.

Расчеты показывают, что в средней полосе РФ двухэтажный дом площадью 100 м² за год получает более 160 МВт-час солнечной энергии, что превышает всю его годовую потребность. Современные технические решения

позволяют использовать лишь только до 30% приходящей солнечной энергии [23].

В РФ развитие возобновляемых источников энергии достаточно затруднено в связи с возможностью доступа к относительно недорогим источникам газа, нефти, угля, торфа. Однако стоимость добычи и транспортировки постоянно возрастает, тем самым увеличивая тарифы на энергоресурсы. Кроме того, порядка 20 млн. человек не имеют доступа к централизованным сетям газа и теплоснабжения. Эти факторы увеличивают привлекательность возобновляемых источников энергии в РФ [24].

Примером развития возобновляемых источников энергии на территории РФ является Камчатка. Верхне-Мутновской и Мутновской геотермальные электростанции позволили решить ряд проблем с энергоснабжением полуострова.

Одним из толчков по внедрению возобновляемых источников энергии является создание атласов распределения ресурсов возобновляемой энергии по территории России, в том числе солнечной радиации. Такой документ создан в лаборатории возобновляемых источников энергии и энергосбережения ИВТ РАН (рисунок 1.3).

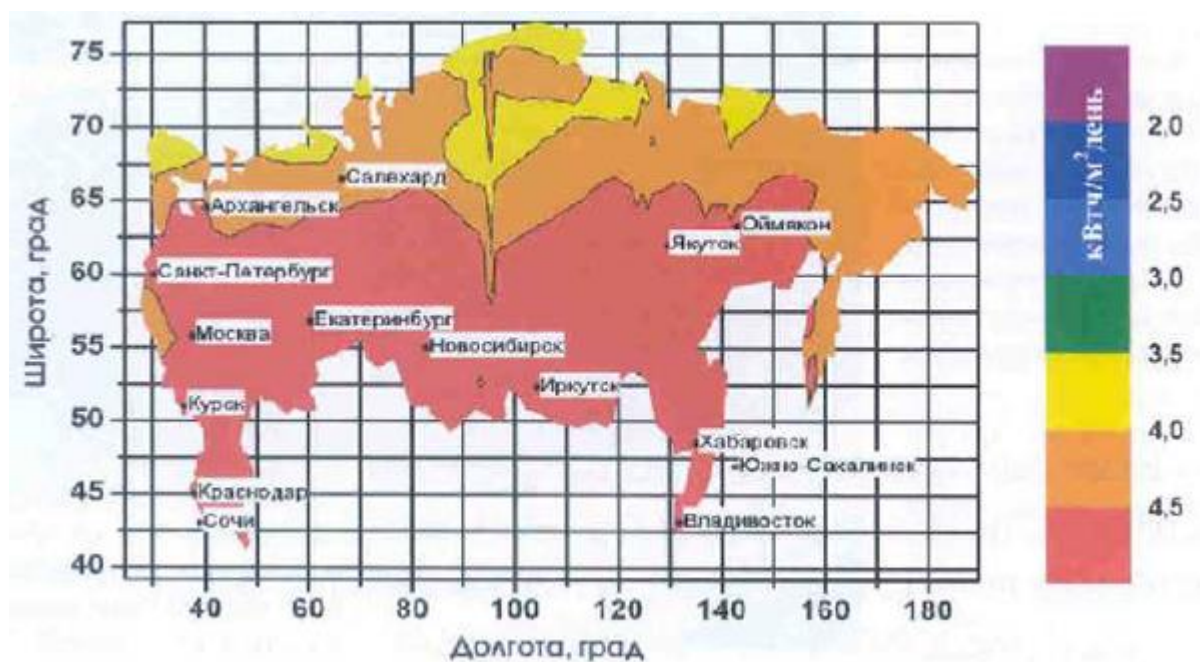


Рисунок 1.3. Распределение солнечной энергии по территории РФ

Карта позволяет определить целесообразность использования солнечной энергии в регионах РФ. На рисунке 1.3 показано среднегодовое распределение ресурсов солнечной энергии, поступающей за день на 1 м² горизонтальной поверхности. Из анализа карты следует, что, вопреки сложившемуся мнению не районы Северного Кавказа, а регионы Приморья и юга Сибири наиболее интересны для использования солнечной энергии. Территория юга России по количеству солнечной энергии сопоставима с Якутией [25].

Основным фактором, обуславливающим целесообразность применения солнечных установок, является количество дней ясной погоды в течение года. Однако для некоторых регионов РФ существует большая разница в количестве солнечной энергии летом и зимой. В средней полосе России поступление солнечного излучения в летний период в пять раз больше, чем в зимний.

На карте распределения поступления солнечной радиации на территории России за летний период видно, что большинство районов страны вплоть до 65° северной широты характеризуются примерно одинаковыми высокими значениями среднедневной радиации от 4,5 до 5 кВт-ч/м в день, и с этой точки зрения энергетическая эффективность улавливающих устройств на всей этой территории оказывается приблизительно одинаковой.

1.4. Устройства, утилизирующие солнечную энергию

Наибольшую популярность приобрели тепловые солнечные коллекторы. На международном рынке данный класс технических устройств широко представлен различными производителями. Инженерному сообществу хорошо известны основные их преимущества и недостатки. На данный момент максимальное извлечение тепловой энергии можно осуществить в концентраторных коллекторах, но они имеют сложное устройство, ряд возникающих трудностей при эксплуатации и высокую стоимость [26].

Поглощающие солнечную энергию наружные ограждения являются простейшими и малозатратными устройствами. Слои ограждающей конструкции располагаются следующим образом: снаружи тонкое темный слой, эффективно поглощающий солнечное излучение, затем воздушная прослойка, посредством которой нагретый воздух перетекает внутрь здания через специальные отверстия. Через отверстия внизу обеспечивается отток холодного воздуха из помещения в нагревательную полость с повторением цикла.

Существуют наружные ограждения с прозрачной теплоизоляцией. Слой теплоизоляционного материала представляет открыто-ячеистую структуру, способную снизить теплотери конструкции. Следующий слой поглощает солнечную энергию, он нагревает несущий материал стены и через него воздух помещений. Существует решение нанесения поглощающего слоя на наружные ограждения по подобию штукатурки или покрытия. Нанесение поглощающего слоя превращает стену в пассивный солнечный элемент [27].

Данные инженерно-технические решения целесообразно применять для реконструкции и капитального ремонта существующих зданий с целью повышения их энергетического класса. Применяют предложенные наружные ограждения главным образом в районах с мягкой и малооблачной зимой, где здание подвергается интенсивному облучению солнцем [28,29].

Использование такой технологии целесообразно, если теплотери меньше тепlopоступлений от солнца. В холодном климате необходимо иметь хорошую теплоизоляцию, поэтому для территории РФ следует увязать теплопоглощающий слой с эффективным утеплителем [30].

Солнечные установки размещают на крышах зданий, фасадах преимущественно с южной ориентацией. Гелиоприемники могут изменять свою ориентацию в зависимости от положения солнца и времени года.

Практически все здания являются статичными. Их пространственная ориентация определялась градостроительными и планировочными решениями. Один из способов повышения энергетического класса зданий состоит в том, чтобы южные фасады проектировать с максимальным остеклением и с

поглощающими солнечное излучение элементами, а северные — с эффективным утеплителем. Возможно проектирование вращающихся зданий для эффективной работы солнечных установок.

Первым в мире зданием, способным поворачиваться вокруг оси, является Girasole («Подсолнух») из Вероны, на севере Италии. Жилой дом построен инженером Анджело Инверниции в 1929–1935 годах [31].

Вблизи города Фрайбург (Германия) также реализован проект вращающегося здания. Дом, спроектированный архитектором Рольф Диш, был построен в 1994 году и называется Heliotrop, что в переводе обозначает «поворачивающийся к солнцу». Heliotrop — первое в мире здание, которое производит больше энергии, чем потребляет. Heliotrop представляет собой цилиндрическую конструкцию целиком выполненную из дерева и стекла [32].

Еще одно здание, «следящее» за солнцем, — жилой дом Suite Vollard в городе Куритиба (Бразилия). Одиннадцать этажей этого дома вращаются на 360° независимо друг от друга. Квартиры вращаются вокруг статичной основы, внутри которой расположены инженерные сети и находятся кухни и ванные комнаты. Строительство Suite Vollard стало началом пути к созданию еще более сложных проектов, таких как, например, Rotating Tower («Вращающаяся башня») в Дубае [33,24].

Вращающиеся дома построены уже в США, Канаде, Англии, Франции, Австралии, Новой Зеландии. Возникли фирмы, специализирующиеся на строительстве таких зданий.

Несмотря на опыт строительства подобных сооружений, их эксплуатация является сложной и дорогостоящей и учитывая массивность конструкций возможны сбои в работе и пространственной ориентации [35].

1.5. Оценка теплоаккумулирующих свойств строительных материалов ограждающих конструкций

Теплоаккумулирующая способность ограждений определяется удельной теплоемкостью строительных материалов, их средней плотностью и геометрическими размерами. Физический смысл теплоаккумулирующей способности ограждающей конструкции заключается в возможности накопить и удержать в 1 м² конструкции определенное количество теплоты [36].

Теплофизические свойства материалов обеспечивают постоянство параметров внутреннего микроклимата помещений. При оценке теплоаккумулирующих способностей конструкций следует обратить особое внимание на способы передачи энергии: внутри очень плотных материалов стен — контактной молекулярной теплопередачей; внутри пористых материалов стен — молекулярной передачей тепла, а также тепловым излучением и конвекцией.

Использование теплоаккумулирующей способности в ограждающих конструкциях имеет ряд преимуществ [37]: изменения в работе внутренних инженерных систем не сказываются на параметрах микроклимата; кратковременные притоки холодного воздуха при каждом открывании окон и дверей не приводят к немедленному охлаждению помещений; изменения температуры наружного воздуха не отражаются на внутреннем микроклимате помещения; влажностный режим ограждения остается стабильным в течение всего срока эксплуатации, повреждения конструкций из-за воздействия влаги практически отсутствуют. Возможным недостатком теплоаккумулирующих стеновых конструкций является длительное время нагрева помещений после аварийного отключения инженерных систем.

В системах пассивного солнечного отопления аккумулярование тепловой энергии обеспечивается ограждающими конструкциями. Наиболее эффективными теплоаккумуляторами являются составные элементы здания: стены, перекрытия, крыши и перегородки [38]. Применимой для наших геоданных является наружная стена с теплоаккумулирующим слоем под

светопропускающим остеклением. По мере поглощения солнечного излучения температура стены растет и в ней устанавливается температурный градиент, зависящий от времени. Причем энергия распределяется следующим образом: часть передается в помещение путем теплопередачи, излучения и конвекции, а другая часть теряется через остекление. Стоит отметить, что процесс накопления или аккумуляирования энергии происходит в дневное время, а процесс отдачи в ночное [39]. В зависимости от ряда факторов, таких как географическая широта, климатические условия, материал теплоаккумулирующего слоя и параметров микроклимата помещения, может потребоваться дополнительный источник теплоты или наоборот возникнет необходимость перераспределения избытков накопленной энергии.

Для здания накопление и расход тепловой энергии имеет особое значение. Согласно закону сохранения энергии в наружных ограждениях зданий и сооружений происходит аккумуляирование и последующая отдача тепловой энергии численно равной друг другу, но отличной по знаку и направлению. Суммарную величину теплоты [40], аккумуляированной в процессе теплопередачи от ограждения, можно определить по формуле:

$$Q_{\text{дп}} = \pm \int_0^{0,5z} q_{\text{п}} d\tau = \pm \vartheta_{\text{п}}^{\text{max}} b \sqrt{2} \omega^{-1} = \pm \vartheta_{\text{п}}^{\text{max}} \sqrt{\frac{\lambda(c_p)}{\pi z}} = \pm \vartheta_{\text{п}}^{\text{max}} b (\pi z)^{-0,5}, \text{ Вт/м}^2, \quad (1.13)$$

где $q_{\text{п}}$ – удельный тепловой поток; z – полный период колебаний; b – коэффициент тепловой активности вещества (массива); ω – частота колебаний; λ – коэффициент теплопроводности; (c_p) – объемная теплоемкость массива.

Коэффициент тепловой активности вещества (массива) численно равен

$$b = \sqrt{\lambda c_p}. \quad (1.14)$$

Частота колебаний температурных волн:

$$\omega = 2\pi/z. \quad (1.15)$$

На практике, ограждающую конструкцию с теплоаккумулирующим слоем целесообразно рассматривать как ряд связанных друг с другом тепловой сетью элементов каждый с набором своих физических параметров. Уравнения энергетического баланса для элементов стены можно представить в виде:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{k}{\rho c \Delta x^2} (T_{i-1} - T_{i+1} - 2T_i), i = 2, \dots, N - 1. \quad (1.16)$$

Для зданий, которые не аккумулируют солнечное излучение в течение дня, необходимо возмещать эти теплопотери за счет работы системы отопления или других инженерных систем. Наличие инженерных коммуникаций, конструктивные особенности здания влияют на время остывания. Процесс остывания различных зданий [41] представлен на рисунках 1.4-1.6.

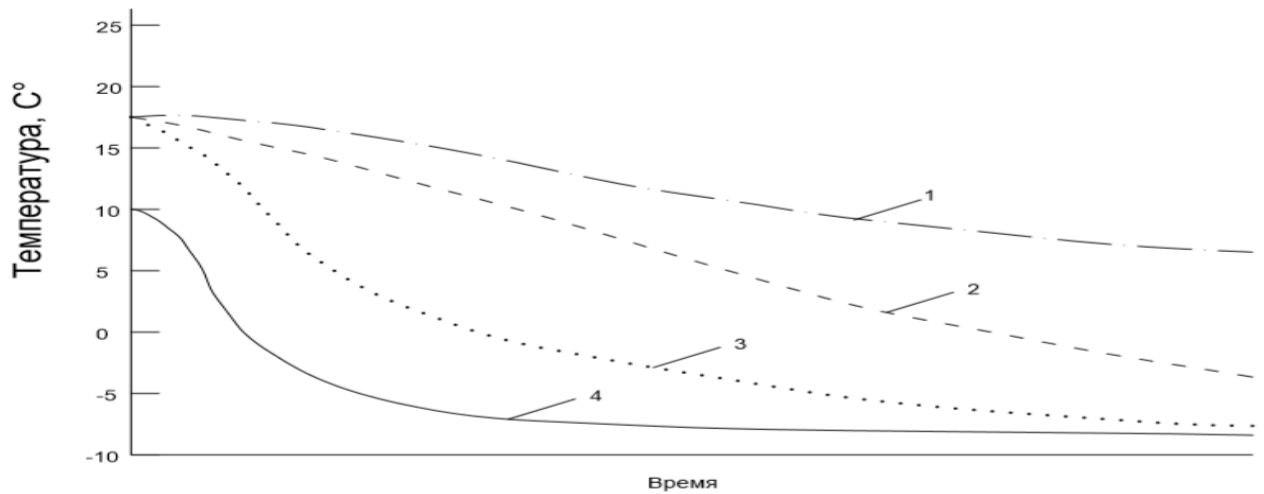


Рисунок 1.4. Влияние уменьшения температуры наружного воздуха на изменение температуры воздуха внутри зданий разных типов при отсутствии дополнительных источников тепловой энергии:

- 1 - воздух внутри массивного здания, заглубленного и частично покрытого грунтом;
- 2 - воздух внутри массивного здания с наружной изоляцией; 3 - воздух легкого здания с деревянным каркасом; 4 - наружный воздух

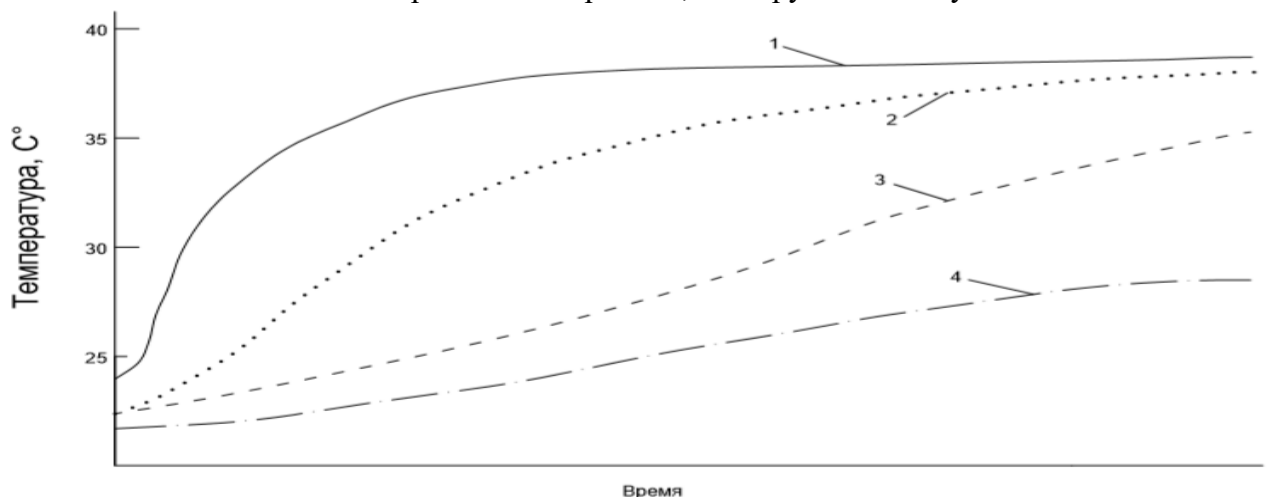


Рисунок 1.5. Влияние повышения температуры наружного воздуха на температуру воздуха внутри зданий разных типов при отсутствии дополнительного источника энергии для охлаждения помещений:

- 1 - наружный воздух; 2 - воздух внутри легкого здания с деревянным каркасом; 3 - воздух внутри массивного здания с наружной изоляцией; 4 - воздух внутри массивного здания, заглубленного и частично покрытого грунтом.

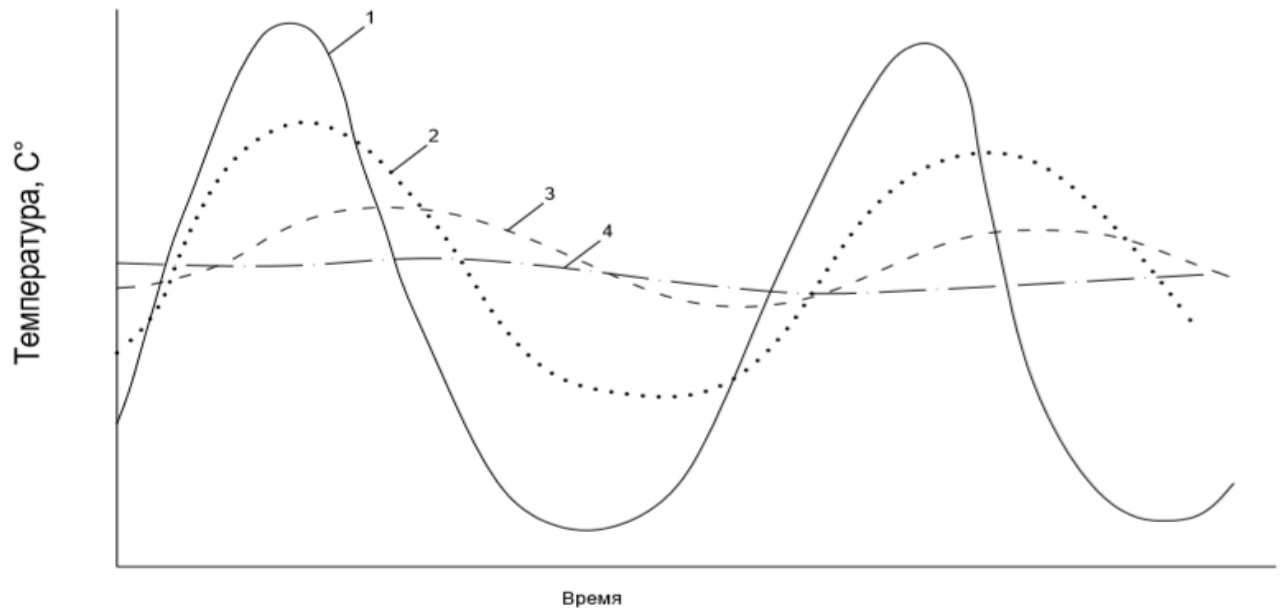


Рисунок 1.6. Влияние колебаний температуры наружного воздуха на температуру воздуха внутри зданий разных типов при отсутствии дополнительного источника энергии для обогрева или охлаждения помещений:
1 - наружный воздух; 2 - воздух внутри легкого здания с деревянным каркасом; 3 - воздух внутри массивного здания с наружной изоляцией; 4 - воздух внутри массивного здания, заглубленного и частично покрытого грунтом.

Исходя из полученных графиков при изменении температуры наружного воздуха быстровозводимые и не массивные сооружения незамедлительно реагируют на перепад наружной температуры. Капитальные здания и сооружения, имеющие несущие конструкции из кирпича и бетона за счет более высокой аккумулирующей способности, меньше подвержены перепадам температуры. Сооружение, пристроенное одной частью к земляному участку или покрытое слоем земли, реагирует на колебания температуры наружного воздуха еще в меньшей степени. В таблице приведены основные теплофизические характеристики материалов, способных аккумулировать солнечную энергию.

Таблица 1.2

Теплофизические характеристики материалов

Вещество	Плотность кг/м ³	Теплоаккумулирующая способность, ч/ (м ³ × °С)	Относительная аккумулирующая способность	Теплопроводность Вт / (м. °С)	Относительная теплопроводность
Вода	1000	1,6	1,00	0,55	1,00
Сталь	7850	1,00	0,86	45,3	82,36
Природный камень	2240	0,58	0,50	1,43	2,60

Окончание таблицы 1.2

Вещество	Плотность кг/м ³	Теплоаккумулирующая способность, ч/ (м ³ × °С)	Относительная аккумулирующая способность	Теплопроводность Вт / (м. °С)	Относительная теплопроводность
Бетон	2300	0,53	0,46	1,65	3,00
Сплошной кирпич	1800	0,46	0,40	0,66	1,20
Гравий, песок	1600	0,37	0,32	0,39	0,70
Грунт	—	0,25	0,15	0,85	1,55
	Сухой				1,16
	Влажный			0,67	

Для теплоаккумулирующего поглощающего слоя помимо самого материала существенную роль играет структура его поверхности, а также ее цвет. Структура поверхностного слоя имеет особое значение, поскольку существенное количество утилизированного тепла передается путем конвекции. Поэтому она должна быть шероховатой или не обработанной, чтобы получить наибольшее количество солнечной энергии. Длинноволновое тепловое излучение хорошо поглощается, как видно из таблицы 1.3, почти всеми строительными материалами.

Таблица 1.3

Теплопоглощающая способность материалов

Вещество	Коротковолновое солнечное излучение	Длинноволновое солнечное излучение
Вода	0,94	0,95—0,96
Бетон	0,60	0,88—0,97
Красный кирпич	0,55	0,92
Песок	0,82	0,90

Наиболее применимым для территории РФ является стена с остеклением и теплоаккумулирующим слоем. Здесь функцию коллектора и аккумулятора будет выполнять ограждающая конструкция. В таком случае тепло в помещение

передается теплопроводностью или за счет циркуляции воздуха с контактом с теплоаккумулирующим материалом.

Величина солнечной радиации [42], прошедшей через остекление и поглощённой вертикальной стеной, может быть рассчитана по зависимостям:

$$A_r S = A_r F_c \left[f_i I_b R_b (\tau \alpha)_b + \frac{I_d (\tau \alpha)_d}{2} + \frac{I \rho_g (\tau \alpha)_g}{2} \right], \quad (1.17)$$

где A_r - площадь, м²; F_c - функция нормирующая поступающую радиацию, f_i - коэффициент затемнения; I_b - падающий поток солнечного излучения; $\tau \alpha$ - угловая зависимость; S - поглощение солнечного излучения, МДж/м²; R_b - отношение среднемесячной суммы прямого излучения, падающего на наклонную поверхность, к сумме падающего на горизонтальную за определенный месяц.

Стена с теплоаккумулирующим слоем может быть как вентилируемой, так и нет. В работе «The effect of Air flow rate in collector-Storage walls», составленной группой авторов во главе с Utzinger M.D., доказано, что потребность в тепловой энергии незначительно зависит от того, является ли стена вентилируемой или нет. Применение оптимальной вентиляции снижает потребность в дополнительном отоплении всего на несколько процентов.

Стоит отметить, что применение стены с теплоаккумулирующим слоем довольно индивидуально и зависит от многих факторов. Ключевым параметром при строительстве будет являться экономическая целесообразность. Например, при реконструкции зданий старой застройки часть теплоаккумулирующей нагрузки в виду плотной застройки может на себя взять часть крыши. В этом случае основным механизмом теплопередачи будет являться тепловое излучение нагретого потолочного перекрытия.

К настоящему времени разработан ряд методов по расчету пассивных систем отопления. Все имеют достаточно высокую точность, но малоприменимы к условиям России.

Разработанный во Франции Method 5000 состоит из 3 этапов. На первом необходимо определить теплотери здания. Здесь стоит обратить особое

внимание на следующее: является ли здание новым или уже построено и идет процесс реконструкции. На втором этапе производится расчет солнечной энергии, поглощенной аккумулирующим слоем. На финальном этапе происходит оценка количества солнечной энергии и недостатков тепловой энергии, которую придется взять от сторонних источников.

Для расчета стен с теплоаккумулирующим слоем довольно часто используют метод соотношения солнечного излучения и нагрузки, в иностранной литературе он известен как SLR. Он основан на определении годовых потребностей в дополнительной энергии и базируется на натурных и компьютерных экспериментах большого количества пассивных систем. В процессе создания метода было протестировано 94 варианта конфигураций пассивных систем и по результатам составлены коэффициенты для инженерных расчетов.

Разработанный для систем прямого нагрева метод «неиспользуемости» с некоторыми изменениями применяется для расчета пассивных стен. Конечным результатом аналогично предыдущей методике является необходимое количество дополнительной энергии. При расчетах тепловая нагрузка разбивается на две части: сначала теплоаккумулирующую стену рассматривают как адиабатическую и расчеты ведутся по известным и общепринятым формулам определения теплопотерь.

Месячное количество тепла, проходящее через теплоаккумулирующую стену, можно представить как сложную функцию параметров стены и микроклимата помещений. Ограждающую конструкцию можно смоделировать как ряд термических сопротивлений, емкостей и внутренних источников. Для оценки годовой производительности системы выполняют ряд последовательных шагов. На первом этапе вычисляются месячные величины поглощенного солнечного излучения. На втором этапе вычисляется нагрузка при принятии теплоаккумулирующей стены адиабатической и определяются теплопотери через ограждения. На третьем этапе определяется месячное количества тепла, проходящее через теплоаккумулирующую стену. На четвертом этапе

вычисляется поток сбрасываемой энергии при принятии теплоемкостью нулевого значения. На пятом этапе производят вычисление и учет параметров, связанных с теплоаккумулирующим слоем ограждающей конструкции. На заключительном этапе определяется доля покрытия отопительной нагрузке, а затем и месячная потребность в отопительной энергии.

Данные методики базируются на определении величины собранной тепловой энергии, расчете теплотерь, составлении баланса между тепlopоступлениями и теплоизбытками, но они не позволяют оценить технические возможности солнечных стеновых панелей для выбора требуемых параметров под конкретные климатические условия. Кроме того, проведенный анализ позволил выявить невостребованные ресурсы для технического совершенствования энергоэффективности наружных ограждений, утилизирующих солнечную радиацию, и необходимость исследований технических характеристик систем для оптимального конструирования.

1.6. Выводы по первой главе

Выполненный анализ технических решений по повышению энергоэффективности зданий позволил сделать следующие выводы:

- энергия солнца, как повсеместно доступный источник, является наиболее перспективной для повышения тепловой эффективности строительства и ЖКХ;
- для эффективной и малозатратной утилизации солнечной радиации целесообразна разработка наружных ограждений с поглощающим теплоаккумулирующим слоем, применимых для климатических условий РФ;
- требуется создание методики расчета теплоаккумулирующих конструкций для проектирования энергоэффективных наружных ограждений.

По итогам первой главы сформулированы задачи исследования. Необходимо выполнить анализ существующих способов повышения энергетической эффективности наружных ограждений для разработки новой математической модели, учитывающей поглощающие и теплоаккумулирующие свойства строительных материалов при воздействии солнечного излучения. На основе результатов исследования целесообразно предложить конструктивное решение наружного ограждения здания с теплоаккумулирующим слоем, экономически целесообразного в определенных регионах строительства.

Глава 2. Тепловые волны в пассивной многослойной солнечной панели

2.1. Физические основы природы тепловых волн

Основы солнечной теплоэнергетики, включая расчет стационарных режимов, в настоящее время достаточно хорошо известны и опробованы на практике [43]. При реальной эксплуатации происходят суточные колебания температуры наружного воздуха и потока солнечной энергии, поэтому перенос тепла в ограждающих конструкциях не является стационарным. В целом проблема переноса тепла в сложных конструкциях исключительно важна при определении инженерных решений так называемых солнечных фасадов, в которых определенным образом организовано пропускание, отражение и поглощение солнечного тепла внутрь здания [44]. Снижение энергопотребления зданий является устойчивой тенденцией для жилых и коммерческих зданий путем рационализации сохранения тепловой энергии в различных накопителях в виде воды, камней или кирпича в качестве тепловых резервуаров. При использовании стен с воздушной прослойкой и внешним остеклением различают вентилируемые и невентилируемые системы [45]. Отметим среди имеющихся решений также гипсово-бетонные панели с воздушными пустотами [46]. Зависимость тепловых потоков от времени в слоистых панелях вполне успешно измеряется экспериментально [47], в то время как теоретическое описание не вполне удовлетворяет практическим запросам.

Для построения теоретической модели может быть использован метод разложения решения по полной системе ортогональных полиномов [48]. Этот метод достаточно громоздкий, и его достоинства в сравнении с хорошо известными прямыми сеточными методами [49] неясны. Одним из наиболее эффективных и легко реализуемых сеточных численных алгоритмов является метод Кранка-Николсона [50]. Для расчета нестационарного переноса тепла в слоистых конструкциях можно также использовать трехдиагональную схему в конечных разностях с итерационным интегрированием [51]. Важным этапом при

численном интегрировании уравнений теплопроводности является правильный учет различных типов граничных условий в рамках выбранной сеточной модели [52]. Сходные по постановке задачи возникают при рассмотрении переноса тепла в слоях тротуара [53]. Для решения соответствующей задачи используется метод конечных элементов. В нем система представляется в виде совокупности элементов, обладающих определенной теплопроводностью. Агрегирование всех конечных элементов позволяет записать уравнение для нестационарного процесса переноса тепла в виде матричных дифференциальных уравнений в обыкновенных производных по времени. Метод конечных элементов используется и при моделировании нестационарного переноса тепла в аэрокосмических сэндвич-панелях [54].

Аналитические методы решения нестационарной задачи опираются, главным образом, на метод Фурье разложения по полному набору функций пространственной задачи на собственные значения [55] или преобразовании Лапласа по переменной времени [56-60]. При использовании метода Фурье в рассматриваемой задаче решение имеет формально простой вид в виде бесконечных рядов для каждого слоя, но очень громоздко и все равно требует численного определения коэффициентов с учетом граничных условий. Метод преобразования Лапласа имеет заметные преимущества перед другими методами при учете сложных временных зависимостей в граничных условиях и для определения асимптотик. Этим методом получено полное решение задачи о тепловом потоке через плоский слой, сопряженный с полубесконечной теплопроводящей средой при периодическом изменении граничных условий [61]. При решении методом преобразования Лапласа задачи о нестационарном переносе в каждом однородном плоском слое требуется решить дифференциальные уравнения второго порядка по пространственной переменной с постоянными коэффициентами и заданными граничными условиями. Эта задача легко решается аналитически, а обратное преобразование Лапласа выполнимо аналитически далеко не всегда. Для случая ступенчатого включения температуры на границы вычисления могут быть проведены

аналитически, и решение задачи представляется в виде суммы функций интеграла ошибки. Данный подход является убедительной альтернативой прямым численным методам [62]. С помощью этого решения можно получить и отклик на произвольную зависимость температуры на границе с помощью интеграла Дюамеля. Для решения нестационарных задач как в полубесконечной среде, так и в слоистых структурах апробировано использование техники интегральных преобразований [63].

В теплотехнике и строительной физике для характеристики переноса тепла используется число Фурье $Fo = a^2 t / x^2$, в котором a^2 – коэффициент температуропроводности ($[a^2] = m^2 / c$), t – промежуток времени ($[t] = c$), x – толщина слоя ($[x] = cm$). Число Фурье характеризует отношение характерных времен системы и теплопередачи через слой заданной толщины [64]. При больших значениях числа Фурье, т.е. при достаточно медленном изменении граничных условий, за время t происходит полный прогрев слоя и нестационарность процесса на таких временах не проявляется [65]. Поток тепла в слое успевает стабилизироваться и он меняется в такт с изменением внешних условий. При относительно медленном изменении внешних условий и внутренних источников тепла, т.е. в условиях квазистационарного прогрева, задача может быть решена полностью аналитически [66]. Значительное внимание обращалось и продолжает уделяться исследованию стационарных режимов переноса тепла в многослойных панелях [67].

Наряду с переносом тепла представляет интерес отслеживание переноса влаги в многослойных панелях и смещение положения точки росы. Поскольку перенос влаги описывается уравнением параболического типа полностью эквивалентным в математическом отношении уравнениям теплопроводности, то на него можно распространить основные методы решения задач теплопроводности в многослойных системах [68].

В предлагаемой нами пассивной системе утилизации солнечной энергии предполагается наличие четырех слоев, два из которых являются воздушными

промежутками. Снаружи воздушный слой отделен от окружающей среды прозрачным для солнечного излучения стеклом. Задачу теплопередачи в такой конструкции необходимо решать с учетом периодического в течение суток изменения наружной температуры и теплового потока, который поглощается главным образом на границе раздела внешнего воздушного промежутка с ограждающей конструкцией.

В качестве общего подхода к решению нестационарных задач теплопроводности целесообразно взять метод наложения температурных полей [69], основанный на фундаментальном свойстве линейности уравнения теплопроводности. Это позволяет произвести декомпозицию исходной задачи на одну стационарную задачу и две нестационарные задачи, которые далее решаются по отдельности. Общее температурное поле находится как сумма тепловых полей, рассчитанных в каждой из этих трех задач.

2.2. Основные уравнения и метод температурных волн

Одномерное распространение тепла в плоском слое некоторой теплопроводящей среды описывается уравнением теплопроводности [70]

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right). \quad (2.1)$$

Если среда однородна, теплопроводность λ не зависит от температуры и уравнение принимает вид:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (2.2)$$

или

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (2.3)$$

где введено обозначение

$$a^2 = \frac{\lambda}{c\rho}. \quad (2.4)$$

Постоянная $\chi = a^2$ называется температуропроводностью среды.

Если в среде присутствуют источники теплоты, то вводится величина $q(x, t)$, равная количеству теплоты, выделяемому источниками в единице объема среды в одну секунду. Тогда вместо уравнения (2.3) получается уравнение

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + f(x, t), \quad (2.5)$$

где $f(x, t) = q(x, t)/(c\rho)$. Далее мы рассматриваем только случай, когда внутренние распределенные источники тепла отсутствуют и $f = 0$. Уравнение (2.5) должно сопровождаться начальными и граничными условиями. Начальные условия описывают распределение температуры в слое в начальный момент времени. Граничные условия задают условия теплообмена с окружающей средой или соседними слоями вещества [71]. На стыке между веществом 1 (слева) и 2 (справа), скажем при $x = 0$, выполняется условие теплового контакта, т.е. равенства температур и равенства тепловых потоков

$$T|_{x=-0} = T|_{x=+0}, \quad (2.6)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=-0} = \lambda_2 \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=+0}. \quad (2.7)$$

Если на границе материалов внутри (int) конструкции поглощается дополнительный тепловой поток с плотностью $j_{\text{int}}(t)$, вызванный внешним световым источником со стороны 2, то условие (2.7) заменяется на

$$\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=-0} = \lambda_2 \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=+0} + j_{\text{int}}(t). \quad (2.8)$$

Теплообмен на поверхности ограждения в точке $x = 0$ учитывается с помощью граничного условия

$$\alpha(T_{\text{ext}}(t) - T(-0, t)) = \lambda_2 \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=-0}, \quad (2.9)$$

в котором $T_{\text{ext}}(t)$ – температура окружающей среды. Это может быть температура наружного воздуха для внешней границы конструкции или температура внутри помещения T_0 , которую мы считаем постоянной.

Уравнение теплопроводности линейно. Следствием этого является важное свойство его решений, называемое принципом суперпозиции температурных возмущений. Пусть $T_1(x,t)$ и $T_2(x,t)$ – какие-либо два решения уравнения теплопроводности. Если почленно сложить эти решения, то сумма $T = T_1 + T_2$ также является решением однородного уравнения (2.3). Сумма произвольного числа решений однородного уравнения теплопроводности сама является решением того же уравнения. Это положение называется принципом суперпозиции (наложения) температурных возмущений.

Принцип суперпозиции позволяет представить исходную задачу в виде совокупности трех более простых независимых задач. Первая задача является стационарной и учитывает все стационарные составляющие в граничных условиях. Две другие задачи являются квазистационарными и описывают установившиеся колебательные температурные режимы. В одной из этих задач периодически по гармоническому закону меняется со временем температура наружного воздуха, так что $T_{\text{ext}}(t) = T_{\text{ext}} + \theta \cos(\omega t)$. В другой задаче периодически меняется поток излучения, поглощаемого внутри конструкции на границе раздела сред: $j_{\text{int}}(t) = j_0 + j \cos(\omega t)$. Квазистационарный режим устанавливается спустя некоторое время, определяемое коэффициентом Фурье $Fo \sim 1$, за которое начальное температурное распределение полностью утрачивается. По прошествии времени релаксации все колебания температуры в среде затухнут, за исключением вынужденных колебаний, поддерживаемых внешними источниками. Вынужденные колебания будут иметь ту же периодичность во времени, что и колебания температуры на поверхности среды.

Прежде чем рассчитывать четырехслойную конструкцию, мы рассмотрим методы и особенности решения на примере двухслойной системы, в которой I слой ограждающей конструкции состоит из бетона или кирпича, а II слой является воздушным промежутком с подавленной конвекцией, отделенным от внешней среды прозрачным для солнечного излучения стеклом. Эта задача позволит выявить характерные особенности модели.

Начнем со стационарной части для того, чтобы в дальнейшем исключить ее из рассмотрения. Стационарное распределение температуры в однородном слое линейное [72, 73], поэтому в первом слое $T_1(x) = a_1 + b_1x$, а во втором $T_2(x) = a_2 + b_2x$. Будем считать, что внутренняя часть помещения располагается при $x < 0$. Геометрия задачи показана на рисунке 2.1.

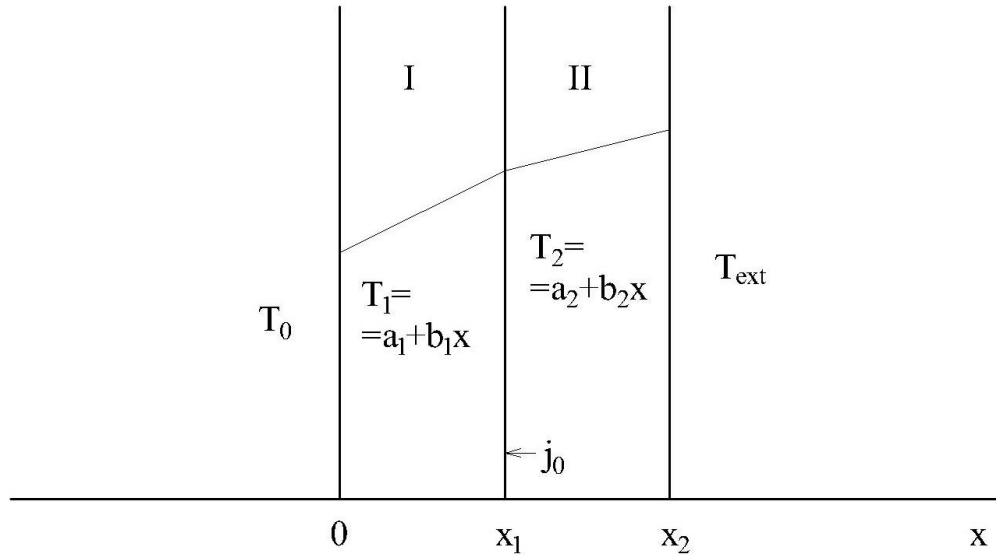


Рисунок 2.1. Стационарный тепловой поток в двойном слое

Запишем граничные условия

$$\alpha_0(T_1(0) - T_0) = \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=0}, \quad (2.10)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=x_1} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{x=x_1} + j_0, \quad T_1(x_1) = T_2(x_1),$$

$$\alpha_{\text{ext}}(T_{\text{ext}} - T_2(x_2)) = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{x=x_2}.$$

Поскольку начало температурной шкалы носит условный характер, мы примем за начало отсчета температуру внутри помещения, произведя формальную замену $T \rightarrow T + T_0$. С учетом кусочной линейности решений

$$\alpha_0 a_1 = \lambda_1 b_1, \quad (2.11)$$

$$\lambda_1 b_1 = \lambda_2 b_2 + j_0,$$

$$a_1 + b_1 x_1 = a_2 + b_2 x_2,$$

$$\alpha_{\text{ext}} (T_{\text{ext}} - a_2 - b_2 x_2) = \lambda_2 b_2.$$

Решение линейной системы алгебраических уравнений относительно коэффициентов a_1, b_1, a_2, b_2 приведено в приложении А. Аналогичным образом решается задача о распространении тепла в многослойных конструкциях. Ее решение также сводится к решению системы линейных уравнений. Таким образом, стационарную задачу, в которую включены средние температуры и средние потоки солнечной энергии, мы будем считать далее решенной.

Перейдем к квазистационарной части задачи. Как известно, периодические колебания в линейных системах удобно рассматривать, переходя к комплексным переменным [74]. При этом в граничных условиях функция $\cos(\omega t)$ заменяется на $\exp(i\omega t)$, а после получения финального решения от него берется действительная часть, являющаяся решением исходной задачи.

Покажем, как это возможно на примере температурных волн [75, 76]. Температурные волны — это изменение температуры в слое (среде) с течением периода, вызванные изменениями плотности тепловых потоков, поступающих в среду. Если на каком-то участке слоя температура периодически изменяется по времени, то это также приведёт к периодическим изменениям температуры и во всех остальных точках среды.

Сначала целесообразно рассмотреть ситуацию, когда среда однородна и заполняет полупространство, ограниченное плоскостью $x = 0$. Ось x направим внутрь среды перпендикулярно границе. Пусть температура на поверхности среды меняется во времени по закону косинуса, колеблясь вокруг нулевого среднего значения. Необходимо найти решение однородного уравнения теплопроводности при указанных условиях.

Будем искать решение в виде комплексной функции

$$T(x, t) = Ae^{i(\omega t - \gamma x)}, \quad (2.12)$$

где A – амплитуда колебания, ω – частота температурного возмущения на границе, γ – неизвестная постоянная. Подставляя (2.12) в однородное теплопроводности, получим уравнение

$$i\omega = -\chi\gamma^2 \quad (2.13)$$

для определения γ . Если выполнено условие (2.13), функция (2.12) будет решением уравнения (2.3) при любой амплитуде A . Постоянная γ является комплексной и может иметь два значения:

$$\gamma_{\pm} = \pm \sqrt{\frac{\omega}{2\chi}}(1-i). \quad (2.14)$$

В результате получаются два независимых решения

$$T(x,t) = A \exp\left(\pm \sqrt{\frac{\omega}{2\chi}}x\right) \exp\left[i\left(\omega t \pm \sqrt{\frac{\omega}{2\chi}}x\right)\right]. \quad (2.15)$$

Одно из этих решений растёт, а другое убывает с ростом x . Для полубесконечной среды физический смысл имеет только затухающее решение, действительная часть которого есть

$$T(x,t) = A \exp\left(-\sqrt{\frac{\omega}{2\chi}}x\right) \cos\left(\omega t - \sqrt{\frac{\omega}{2\chi}}x + \varphi\right). \quad (2.16)$$

Найденное решение удовлетворяет периодическому изменению температуры на поверхности среды.

Если зафиксировать координату x , то в каждой точке соответствующей плоскости пространства температура T совершает во времени гармонические колебания с периодом $2\pi/\omega$.

$$\omega t - \sqrt{\frac{\omega}{2\chi}}x = \text{const}. \quad (2.17)$$

Плоскость постоянной фазы параллельна поверхности среды. Она перемещается в направлении оси x со скоростью $v = \sqrt{2\chi\omega}$. Поэтому возмущения, описываемые решением (2.16), называют температурной волной, а v – фазовой скоростью или просто скоростью этой волны. Температурная волна быстро затухает с расстоянием. На расстоянии $\Delta = \sqrt{2\chi/\omega}$ амплитуда волны убывает в

е раз. При этом фаза меняется на величину 1, т.е. резкое изменение амплитуды происходит на $1/2\pi$ длины волны.

Если в среде распространяется несколько температурных волн, то каждая из них ведёт себя независимо от других и наложенные волны складываются. Возникает интерференция волн. Сложение волн описывается с помощью комплексных решений как векторное сложение колебаний, широко применяемое в электротехнике и радиотехнике [77]. Для удобства дальнейшего анализа температурных волн введем коэффициент затухания волны

$$\beta = \sqrt{\frac{\omega}{2\chi}}. \quad (2.18)$$

На рисунке 2.2 показано распределение температуры в полубесконечной среде для момента времени, когда $\omega t + \varphi = 0$.

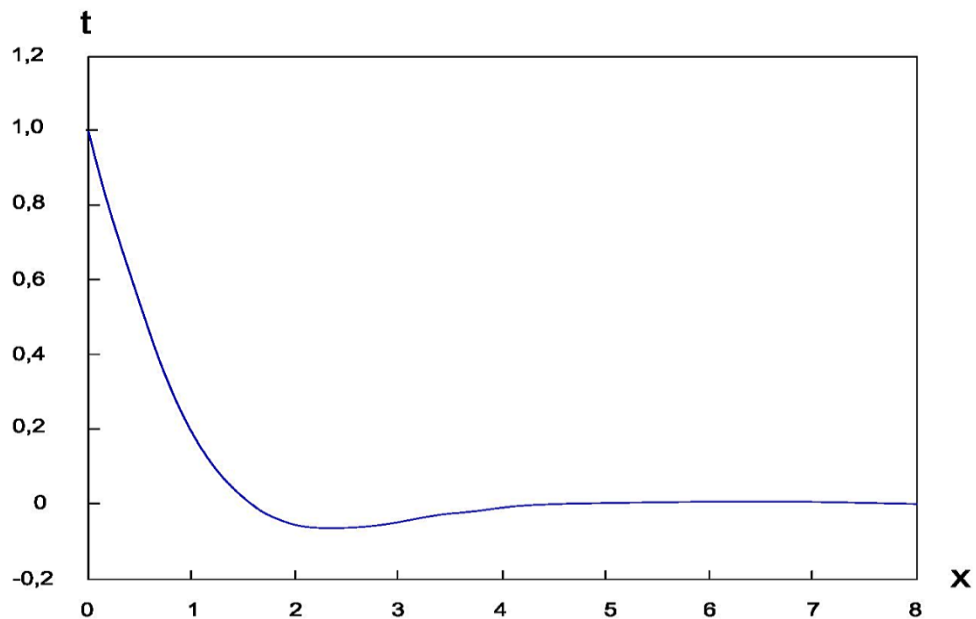


Рисунок 2.2 Пространственное распределение температурной волны

$$T = \exp(-y) \cos(y), y = \beta x \text{ в однородной среде}$$

Если $\beta x \ll 1$, то в решениях (2.15) можно оставить только низшие члены разложения по малому параметру и зависимость от координаты становится линейной, так что решение становится квазистационарным, меняющимся в такт с изменением граничных условий. Тем самым определена применимость квазистатического приближения для тонкослойных (в тепловом смысле) конструкций. В действительности квазистатический режим может

реализовываться для толстых в обычном смысле стен при достаточно медленном изменении внешнего температурного режима.

2.3. Метод расчета переноса тепла в многослойной конструкции

Анализ точного решения для задачи переноса тепла через слой конечной толщины при периодических граничных условиях показывает наличие переотражения тепловых волн от границ [57, 58]. Прежде чем решать общую многослойную задачу, отработаем методику на более простых примерах.

Рассмотрим сначала задачу о переносе тепла в плоском однородном слое, располагающемся в интервале $0 < x < x_1$ с гармоническим граничным условием $T_{\text{ext}}(t) = \theta \exp(i\omega t)$. Решение ищем в виде суммы прямой и отраженной волн:

$$T(x, t) = A \exp(-\beta x - i\beta x) \exp(i\omega t) + B \exp(\beta x + i\beta x) \exp(i\omega t) = \\ = [A \exp(-\gamma x) + B \exp(\gamma x)] \exp(i\omega t). \quad (2.19)$$

Граничные условия

$$\alpha T(+0, t) = \lambda \left. \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \right|_{x=+0}, \\ \alpha (T_{\text{ext}}(t) - T(l-0, t)) = \lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=l-0}. \quad (2.20)$$

Здесь мы считаем, что средняя температура внутри и снаружи слоя одинакова и равна нулю. Два граничных условия позволяют определить две неизвестные константы $A = A_0 e^{i\varphi_-}$, $A_0 = |A|$ и $B = B_0 e^{i\varphi_+}$, $B_0 = |B|$. Расчет констант приведен в приложении Б. Зная их, мы можем записать решение (2.19) в виде

$$T(x, t) = A_0 e^{i\varphi_-} \exp(-\beta x - i\beta x) \exp(i\omega t) + B_0 e^{i\varphi_+} \exp(\beta x + i\beta x) \exp(i\omega t) = \\ = A_0 \exp(-\beta x) \exp(-i\beta x + i\omega t + i\varphi_-) + |B| \exp(\beta x) \exp(i\omega t + i\beta x + i\varphi_+). \quad (2.21)$$

Тогда искомое действительное решение имеет вид

$$T(x, t) = A_0 \exp(-\beta x) \cos(-\beta x + \omega t + \varphi_-) + B_0 \exp(\beta x) \cos(\omega t + \beta x + \varphi_+). \quad (2.22)$$

Обратимся теперь к задаче с двумя слоями. Сначала решим вновь задачу с заданным периодическим изменением температурой наружной среды, а затем

задачу с периодически изменяемым тепловым потоком, падающим из внешней среды и поглощаемым на границе раздела двух слоев внутри конструкции. Рисунок 2.3 поясняет условия задачи.

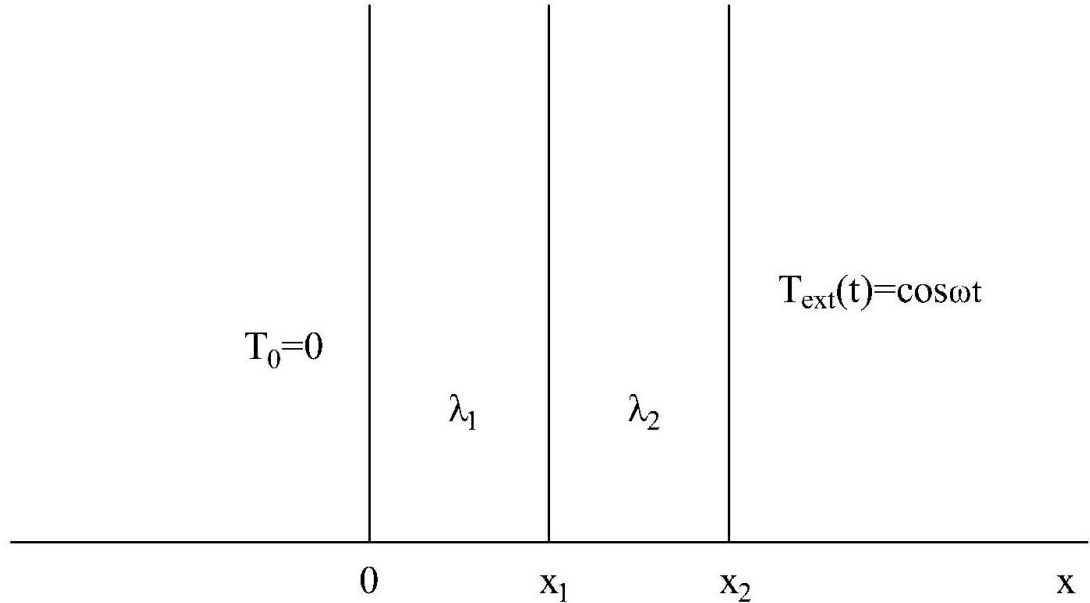


Рисунок 2.3. Двухслойная система с периодическим температурным граничным условием

Для решения данной задачи выберем амплитуду колебаний температуры равной единице и перейдем к комплексному представлению. Как и ранее в окончательном виде решения нужно взять действительную часть, а произвольная амплитуда колебаний θ учитывается просто умножением на нее полученного решения в силу линейности задачи. Итак,

$$T_{\text{ext}}(t) = e^{i\omega t}. \quad (2.23)$$

Выпишем все граничные условия для данной геометрии

$$\alpha_1 T(+0, t) = \lambda_1 \left. \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \right|_{x=+0}, \quad (2.24)$$

$$T(x_1 - 0, t) = T(x_1 + 0, t),$$

$$\lambda_1 \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=x_1-0} = \lambda_2 \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x_1=+0},$$

$$\alpha_2(\exp(i\omega t) - T(x_2 - 0, t)) = \lambda_2 \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=x_2-0}.$$

Решение ищем в виде

$$T(x, t) = u(x) \exp(i\omega t). \quad (2.25)$$

С учетом этого граничные условия примут вид

$$\alpha_1 u(+0) = \lambda_1 \frac{\partial u(x)}{\partial x} \Big|_{x=+0}, \quad (2.26)$$

$$u(x_1 - 0) = u(x_1 + 0),$$

$$\lambda_1 \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=x_1-0} = \lambda_2 \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x_1=+0},$$

$$\alpha_2(1 - u(x_2 - 0)) = \lambda_2 \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=x_2-0}.$$

Сами решения $u(x)$ в двух областях I и II запишутся в виде

$$u_1(x) = A_1 \exp(-\gamma_1 x) + B_1 \exp(\gamma_1 x), \quad (2.27)$$

$$u_2(x) = A_2 \exp(-\gamma_2 x) + B_2 \exp(\gamma_2 x),$$

где $\gamma = \beta + i\beta$. Граничные условия (26) позволяют получить четыре линейных уравнения для определения четырех неизвестных постоянных A_1, B_1, A_2, B_2 :

$$\alpha_1(A_1 + B_1) = \lambda_1(-\gamma_1 A_1 + \gamma_1 B_1), \quad (2.28)$$

$$A_1 \exp(-\gamma_1 x_1) + B_1 \exp(\gamma_1 x_1) = A_2 \exp(-\gamma_2 x_1) + B_2 \exp(\gamma_2 x_1),$$

$$\lambda_1(-\gamma_1 A_1 \exp(-\gamma_1 x_1) + \gamma_1 B_1 \exp(\gamma_1 x_1)) = \lambda_2(-\gamma_2 A_2 \exp(-\gamma_2 x_1) + \gamma_2 B_2 \exp(\gamma_2 x_1))$$

$$\alpha_2(A_2 \exp(-\gamma_2 x_2) + B_2 \exp(\gamma_2 x_2) - 1) = \lambda_2(-\gamma_2 A_2 \exp(-\gamma_2 x_2) + \gamma_2 B_2 \exp(\gamma_2 x_2)).$$

Окончательное решение в области I

$$T_1(x, t) = a_1 \exp(-\beta_1 x) \cos(\omega t - \beta_1 x + \varphi_{1-}) + b_1 \exp(\beta_1 x) \cos(\omega t + \beta_1 x + \varphi_{1+}), \quad (2.29)$$

а в области II

$$T_2(x, t) = a_2 \exp(-\beta_2 x) \cos(\omega t - \beta_2 x + \varphi_{2-}) + b_2 \exp(\beta_2 x) \cos(\omega t + \beta_2 x + \varphi_{2+}). \quad (2.30)$$

Здесь $A_1 = a_1 e^{i\varphi_{1-}}, a_1 = |A_1|; B_1 = b_1 e^{i\varphi_{1+}}, b_1 = |B_1|; A_2 = a_2 e^{i\varphi_{2-}}, a_2 = |A_2|;$

$$B_2 = b_2 e^{i\varphi_{2+}}, b_2 = |B_2|.$$

Система уравнений может быть решена аналитически, но получаемые выражения слишком громоздки. Удобнее решать эту систему численно. Внутренний слой из силикатного кирпича имеет тепловые параметры: $\rho = 1900 \text{ кг/м}^3$, коэффициент теплопроводности $\lambda = 0,81 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$, удельная теплоемкость $c = 0,84 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$ [75]. Параметры воздушной прослойки при температуре 20°C : плотность $\rho = 1,166 \text{ кг/м}^3$, коэффициент теплопроводности $\lambda = 0,0258 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$, удельная теплоемкость $c = 1 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$. Теплообмен с внешней средой мы будем считать преимущественно конвективным и рассчитывать коэффициент теплообмена по формуле [69]

$$\alpha = 1,66 \sqrt{\Delta T} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}. \quad (2.31)$$

В рамках линейной модели коэффициент теплообмена выбирается постоянным по средней разности температур ΔT поверхности и среды. Определим величину коэффициента затухания тепловой волны в кирпичной стене

$$\beta = \sqrt{\omega} \sqrt{\frac{c\rho}{2\lambda}} [1/\text{м}].$$

Период колебаний составляет сутки, поэтому $T = 24 \cdot 60 \cdot 60 \text{ с}$, $\sqrt{\omega} = 0,0085$,
 $\sqrt{\frac{c\rho}{2\lambda}} = \sqrt{\frac{0,84 \cdot 1,9 \cdot 10^6}{2 \cdot 0,81}} = 992$, $\beta = 8,43 \text{ м}^{-1}$. Ясно, что в кирпиче тепловые колебания затухают на расстоянии около 20 см. Для коэффициента затухания в невентилируемой воздушной прослойке $\sqrt{\frac{c\rho}{2\lambda}} = \sqrt{\frac{1005 \cdot 1,205}{2 \cdot 0,0259}} = 153$, $\beta = 12,3 \text{ м}^{-1}$.
 Тем самым, для воздушного слоя толщиной около 10 см реализуется практически полное прогревание и расчет распределения температуры можно проводить на основе текущих граничных условий, считая их стационарными, что приводит к линейному температурному профилю внутри слоя.

На рисунке 2.4 приведены результаты расчета температурных колебаний для двухслойной панели при амплитуде колебаний наружной температуры 1 К.

Система уравнений для расчета комплексных амплитуд решения и пример расчета с нелинейным режимом затухания приведены в приложении В.

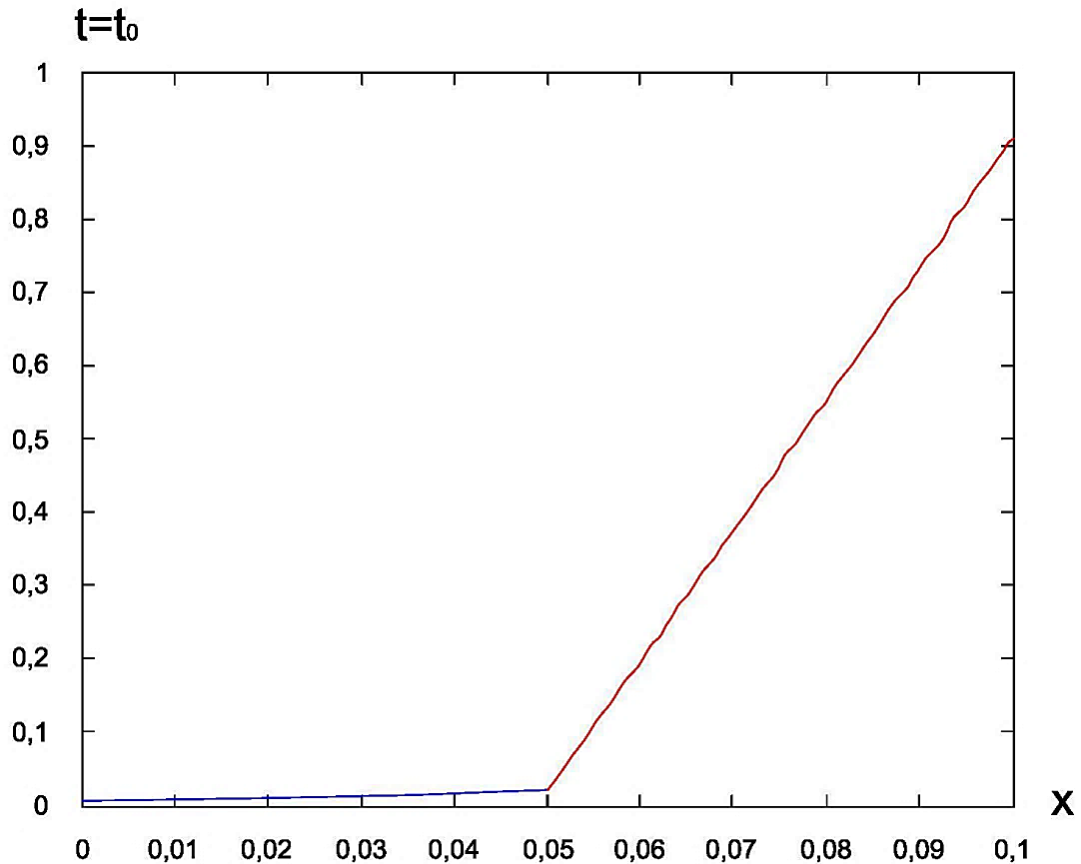


Рисунок 2.4. Распределение температуры в двухслойной структуре: толщина кирпича 5 см (слева), толщина воздушного зазора 5 см (справа). Температурный перепад 1К

Данный расчет показывает реализацию для термически тонких слоистых конструкций квазистатической линейной теплопроводности.

Рассмотрим теперь двухслойную систему, в которой наружный слой пропускает периодический по времени тепловой поток, который поглощается на границе раздела слоев, как показано на рисунке 2.5. Средний поток прямого солнечного излучения составляет варьируемую от широты, времени года и состояния атмосферы величину порядка $j_{\text{ext}} = 1000 \text{ Вт} / \text{м}^2$, которую мы возьмем за стандартный тепловой поток.

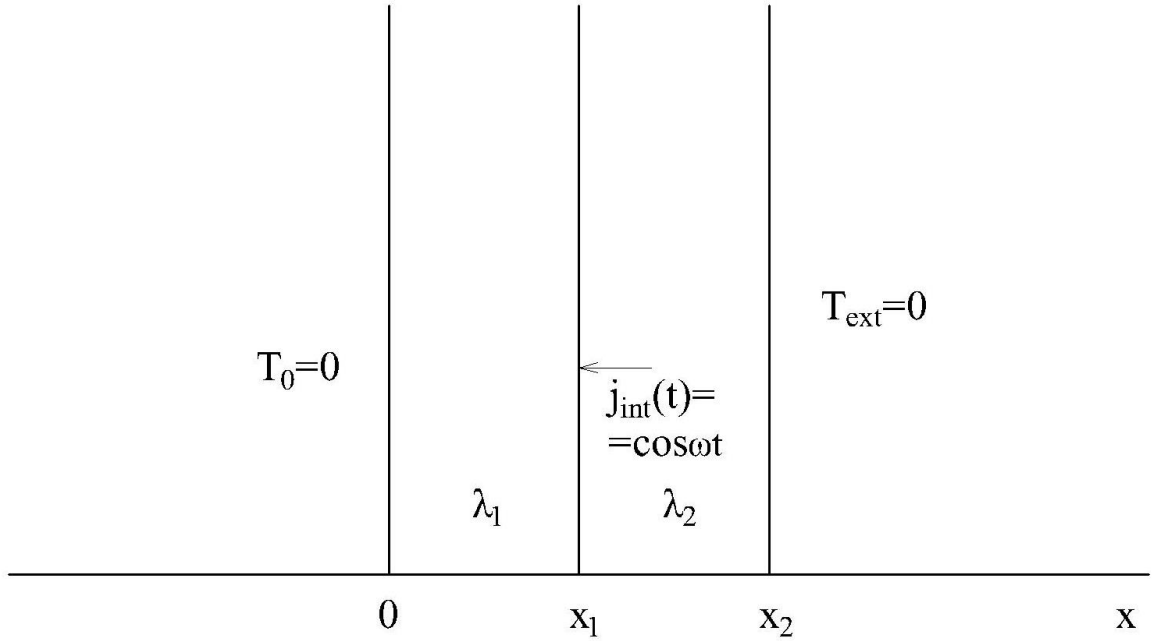


Рисунок 2.5. Двухслойная система с периодическим тепловым потоком на границе слоев

В этом случае граничные условия принимают вид

$$\alpha_1 T(+0, t) = \lambda_1 \left. \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \right|_{x=+0}, \quad (2.32)$$

$$T(x_1 - 0, t) = T(x_1 + 0, t),$$

$$\lambda_1 \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=x_1-0} = \lambda_2 \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x_1=+0} + j_{\text{int}}(t),$$

$$\alpha_2 T(x_2 - 0, t) = \lambda_2 \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=x_2-0}.$$

Нам достаточно решить задачу со стандартной амплитудой теплового потока $j_{\text{ext}}(t) = 1000 \cdot \cos(\omega t) \text{ Bm}/\text{m}^2$. Максимальное значение потока с учетом постоянной средней составляющей $1000 \text{ Bm}/\text{m}^2$ составит $j_{\text{max}} = 1000 \text{ Bm}/\text{m}^2$. Тогда решение при произвольной амплитуде находится простым умножением этого решения на множитель близкий к единице, характеризующий реальную текущую амплитуду. Представляя искомое решение в виде (2.25), получим

$$\alpha_1 u(+0) = \lambda_1 \left. \frac{\partial u(x)}{\partial x} \right|_{x=+0}, \quad (2.33)$$

$$u(x_1 - 0) = u(x_1 + 0),$$

$$\lambda_1 \left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_{x=x_1-0} = \lambda_2 \left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_{x_1=+0} + 1000,$$

$$\alpha_2 u(x_2 - 0) = \lambda_2 \left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_{x=x_2-0}.$$

Подстановка (2.27) для пространственных частей решения дает уравнения для определения констант в виде

$$\alpha_1 (A_1 + B_1) = \lambda_1 (-\gamma_1 A_1 + \gamma_1 B_1), \quad (2.34)$$

$$A_1 \exp(-\gamma_1 x_1) + B_1 \exp(\gamma_1 x_1) = A_2 \exp(-\gamma_2 x_1) + B_2 \exp(\gamma_2 x_1),$$

$$\begin{aligned} \lambda_1 (-\gamma_1 A_1 \exp(-\gamma_1 x_1) + \gamma_1 B_1 \exp(\gamma_1 x_1)) = \\ = \lambda_2 (-\gamma_2 A_2 \exp(-\gamma_2 x_1) + \gamma_2 B_2 \exp(\gamma_2 x_1)) + 1000, \end{aligned}$$

$$\alpha_2 (A_2 \exp(-\gamma_2 x_2) + B_2 \exp(\gamma_2 x_2)) = \lambda_2 (-\gamma_2 A_2 \exp(-\gamma_2 x_2) + \gamma_2 B_2 \exp(\gamma_2 x_2)).$$

Используя коэффициенты полученные в результате подстановки в (2.34) рассчитаем температурные колебания в двухслойной панели и представим их графически (рисунке 2.6)

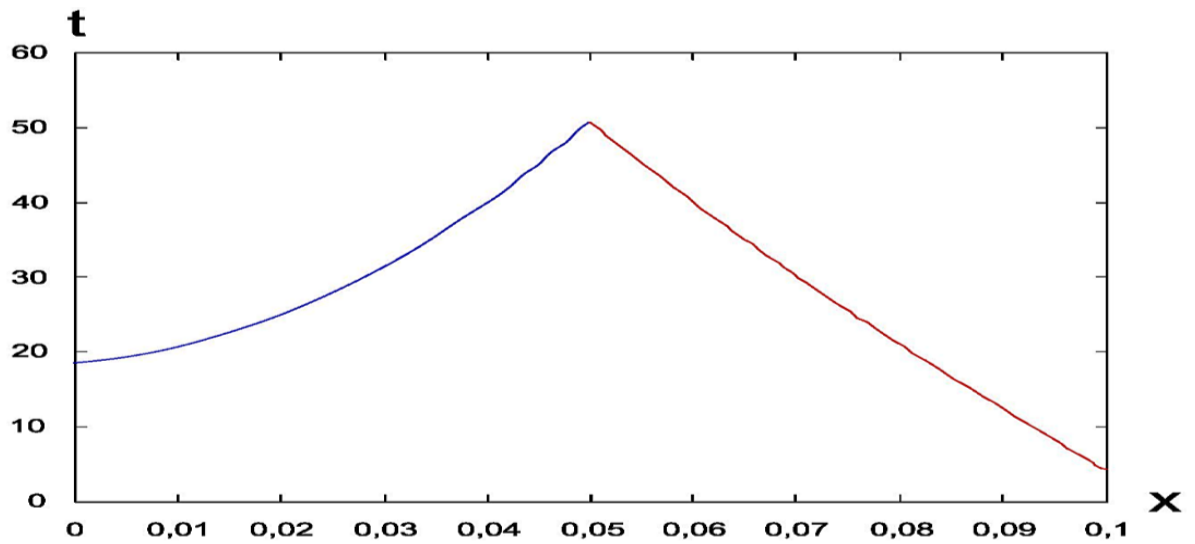


Рисунок 2.6. Температурные волны в двухслойной панели при периодическом изменении теплового потока 1000 Вт/м^2 , поглощаемого на внутренней границе раздела: толщина кирпича 5 см (слева), толщина воздушного зазора 5 см (справа)

На рисунке 2.6 приведены результаты расчета температурных колебаний для двухслойной панели при поглощении излучения на границе раздела внешнего слоя воздуха (справа) и слоя кирпича (слева).

2.4. Расчет переноса тепла в четырехслойной конструкции

Нам осталось рассмотреть тепловые потоки в основной четырехслойной конструкции панели: утеплитель, слой воздуха, бетон, слой воздуха [75]. Слои перечислены в направлении из помещения наружу, как показано на рисунке 2.7.

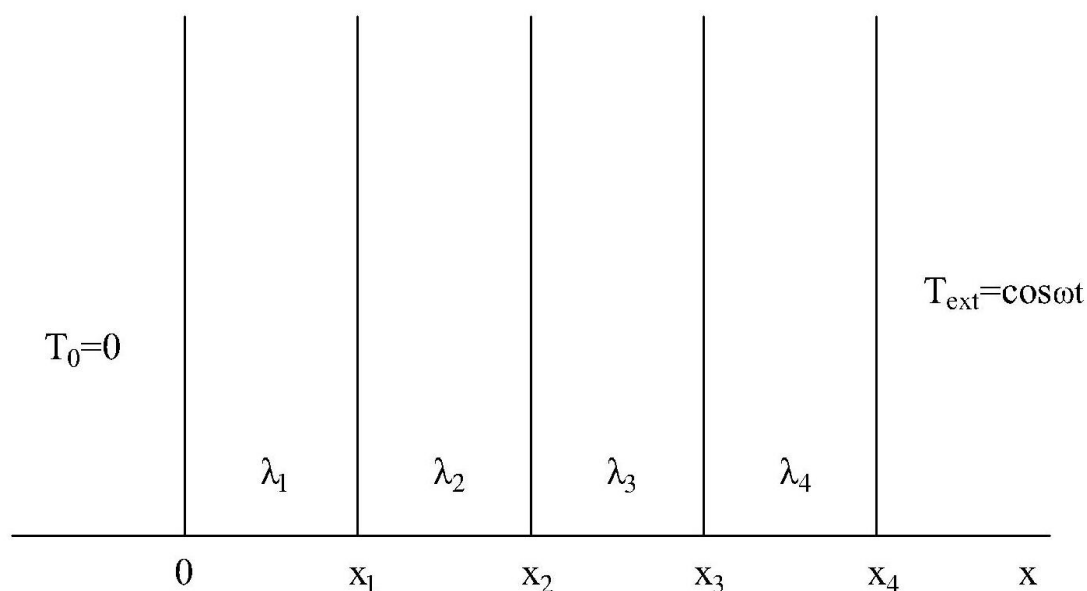


Рисунок 2.7. Схема четырехслойной панели с переменной внешней температурой

Первый слой представляет собой теплоизолирующий слой из минеральной ваты толщиной 5 см. Второй слой – воздушная прослойка толщиной 5 см. Третий слой – железобетонная стенка толщиной 10 см. Четвертый слой – внешний воздушный промежуток толщиной 5 см, отделенный от окружающей среды пропускающим свет стеклом. Для проведения конкретного расчета мы выберем в качестве утеплителя минеральную вату «Роквул» с характеристиками (СНиП

23-02-2003) $\rho = 158 \text{ кг/м}^3$ коэффициент теплопроводности $\lambda = 0,037 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$, удельная теплоемкость $c = 0,84 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$ [75]. Для коэффициента затухания

в минеральной вате $\sqrt{\frac{c\rho}{2\lambda}} = \sqrt{\frac{840 \cdot 158}{2 \cdot 0,037}} = 1339$, $\beta = 11,38 \text{ м}^{-1}$. Теплофизические

постоянные железобетона следующие: $\rho = 2200 \text{ кг/м}^3$, $\lambda = 1,55 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$, $c = 0,84 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$. Коэффициент затухания в железобетоне

$$\sqrt{\frac{c\rho}{2\lambda}} = \sqrt{\frac{840 \cdot 2200}{2 \cdot 1,55}} = 772, \quad \beta = 6,56 \text{ м}^{-1}$$

Пространственная часть решения в каждой области $k = 1, 2, 3, 4$ имеет вид

$$u_k(x) = A_k \exp(-\gamma_k x) + B_k \exp(\gamma_k x). \quad (2.35)$$

Расчет распределения температуры в двухслойной системе бетон-воздух на основе тепловых волн.

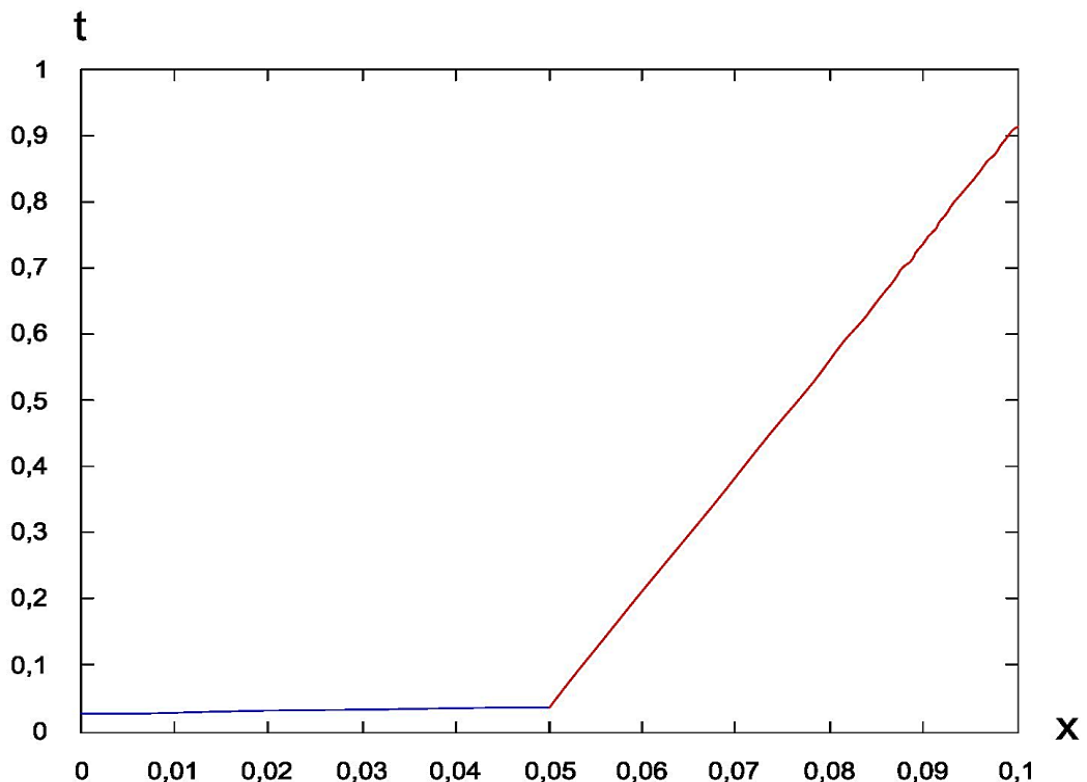


Рисунок 2.8. Результат расчета распределения температуры в двухслойной системе бетон-воздух на основе тепловых волн

Решим сначала задачу теплопередачи при переменной внешней температуре и нулевых средних значениях температуры внутри и снаружи панели. Из граничных условий мы получаем следующие уравнения для определения коэффициентов A_k, B_k :

$$\alpha_1(A_1 + B_1) = \lambda_1(-\gamma_1 A_1 + \gamma_1 B_1), \quad (2.36)$$

$$A_1 \exp(-\gamma_1 x_1) + B_1 \exp(\gamma_1 x_1) = A_2 \exp(-\gamma_2 x_1) + B_2 \exp(\gamma_2 x_1),$$

$$\lambda_1(-\gamma_1 A_1 \exp(-\gamma_1 x_1) + \gamma_1 B_1 \exp(\gamma_1 x_1)) = \lambda_2(-\gamma_2 A_2 \exp(-\gamma_2 x_1) + \gamma_2 B_2 \exp(\gamma_2 x_1))$$

$$A_2 \exp(-\gamma_2 x_2) + B_2 \exp(\gamma_2 x_2) = A_3 \exp(-\gamma_3 x_2) + B_3 \exp(\gamma_3 x_2),$$

$$\lambda_2(-\gamma_2 A_2 \exp(-\gamma_2 x_2) + \gamma_2 B_2 \exp(\gamma_2 x_2)) = \lambda_3(-\gamma_3 A_3 \exp(-\gamma_3 x_2) + \gamma_3 B_3 \exp(\gamma_3 x_2)),$$

$$A_3 \exp(-\gamma_3 x_3) + B_3 \exp(\gamma_3 x_3) = A_4 \exp(-\gamma_4 x_3) + B_4 \exp(\gamma_4 x_3),$$

$$\lambda_3(-\gamma_3 A_3 \exp(-\gamma_3 x_3) + \gamma_3 B_3 \exp(\gamma_3 x_3)) = \lambda_4(-\gamma_4 A_4 \exp(-\gamma_4 x_1) + \gamma_4 B_4 \exp(\gamma_4 x_1)),$$

$$\alpha_4(A_4 \exp(-\gamma_4 x_4) + B_4 \exp(\gamma_4 x_4) - 1) = \lambda_4(-\gamma_4 A_4 \exp(-\gamma_4 x_4) + \gamma_4 B_4 \exp(\gamma_4 x_4)).$$

Программа решения задачи теплопроводности четырехслойной панели с переменной внешней температурой приведена в приложении Г.

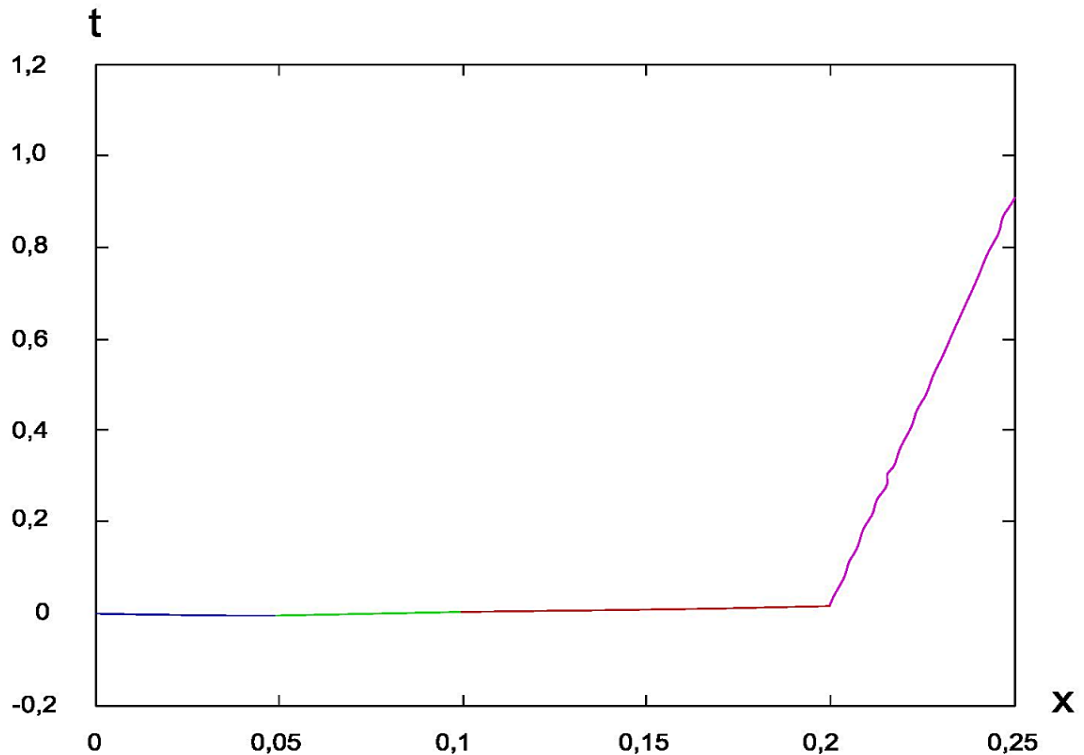


Рисунок 2.9. Результаты расчета распределения температуры в четырехслойной панели с переменной внешней температурой

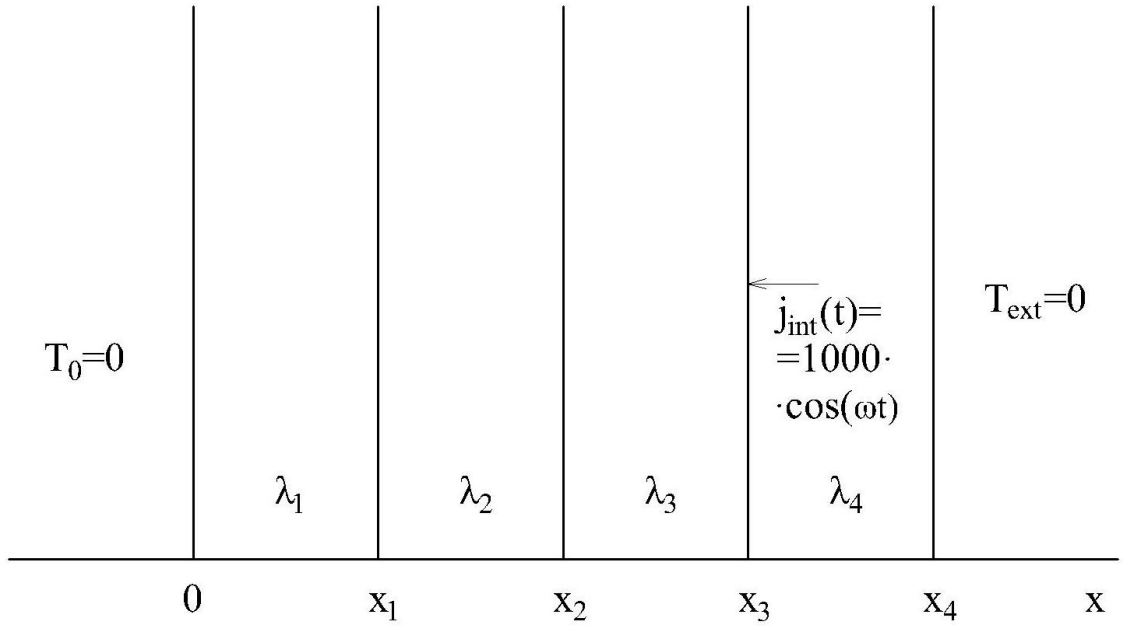


Рисунок 2.10. Схема четырехслойной панели с переменным поглощаемым потоком энергии

$$\alpha_1(A_1 + B_1) = \lambda_1(-\gamma_1 A_1 + \gamma_1 B_1), \quad (2.37)$$

$$A_1 \exp(-\gamma_1 x_1) + B_1 \exp(\gamma_1 x_1) = A_2 \exp(-\gamma_2 x_1) + B_2 \exp(\gamma_2 x_1),$$

$$\begin{aligned} \lambda_1(-\gamma_1 A_1 \exp(-\gamma_1 x_1) + \gamma_1 B_1 \exp(\gamma_1 x_1)) = \\ = \lambda_2(-\gamma_2 A_2 \exp(-\gamma_2 x_1) + \gamma_2 B_2 \exp(\gamma_2 x_1)), \end{aligned}$$

$$\alpha_2(A_2 \exp(-\gamma_2 x_2) + B_2 \exp(\gamma_2 x_2)) = \lambda_2(-\gamma_2 A_2 \exp(-\gamma_2 x_2) + \gamma_2 B_2 \exp(\gamma_2 x_2)).$$

$$A_1 \exp(-\gamma_1 x_1) + B_1 \exp(\gamma_1 x_1) = A_2 \exp(-\gamma_2 x_1) + B_2 \exp(\gamma_2 x_1),$$

$$\lambda_1(-\gamma_1 A_1 \exp(-\gamma_1 x_1) + \gamma_1 B_1 \exp(\gamma_1 x_1)) = \lambda_2(-\gamma_2 A_2 \exp(-\gamma_2 x_1) + \gamma_2 B_2 \exp(\gamma_2 x_1))$$

$$A_2 \exp(-\gamma_2 x_2) + B_2 \exp(\gamma_2 x_2) = A_3 \exp(-\gamma_3 x_2) + B_3 \exp(\gamma_3 x_2),$$

$$\lambda_2(-\gamma_2 A_2 \exp(-\gamma_2 x_2) + \gamma_2 B_2 \exp(\gamma_2 x_2)) = \lambda_3(-\gamma_3 A_3 \exp(-\gamma_3 x_2) + \gamma_3 B_3 \exp(\gamma_3 x_2)),$$

$$A_3 \exp(-\gamma_3 x_3) + B_3 \exp(\gamma_3 x_3) = A_4 \exp(-\gamma_4 x_3) + B_4 \exp(\gamma_4 x_3),$$

$$\begin{aligned} \lambda_3(-\gamma_3 A_3 \exp(-\gamma_3 x_3) + \gamma_3 B_3 \exp(\gamma_3 x_3)) = \\ = \lambda_4(-\gamma_4 A_4 \exp(-\gamma_4 x_3) + \gamma_4 B_4 \exp(\gamma_4 x_3)) + 1000, \end{aligned}$$

$$\alpha_4(A_4 \exp(-\gamma_4 x_4) + B_4 \exp(\gamma_4 x_4)) = \lambda_4(-\gamma_4 A_4 \exp(-\gamma_4 x_4) + \gamma_4 B_4 \exp(\gamma_4 x_4)).$$

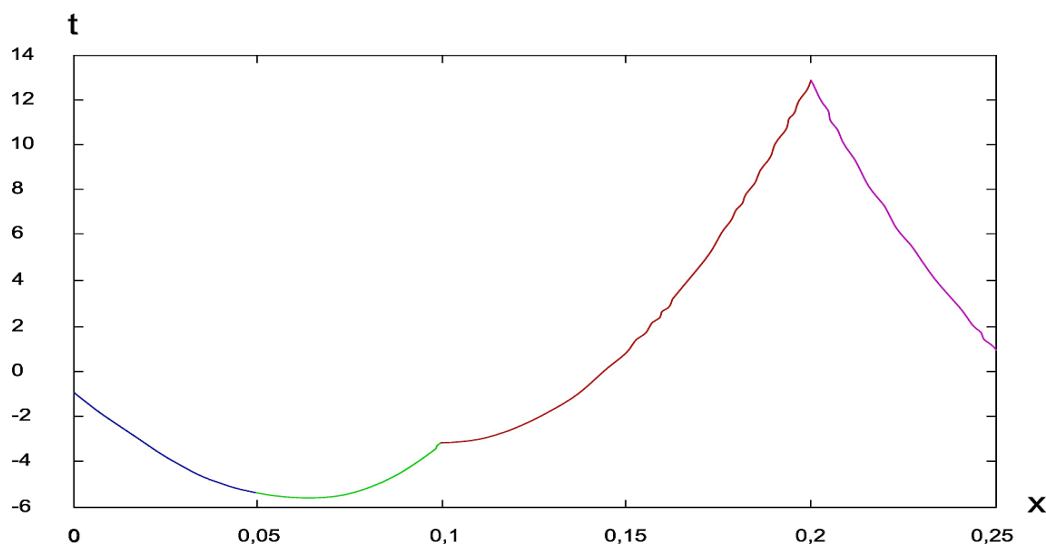


Рисунок 2.11. Результат расчета распределения температуры в четырехслойной панели с переменным поглощаемым потоком энергии амплитудой $500 \text{ Bm}/\text{cm}^2$

Мы завершим рассмотрение расчетом стационарной части задачи. Первая составляющая – расчет температурного поля при перепаде температур внутри и снаружи панели в отсутствие внутренних источников тепла. С учетом кусочной линейности решений полное решение ищем в виде совокупности линейных функций $T_k = a_k x + b_k$. Подставляя эти решения в граничные условия, получим систему уравнений для определения постоянных коэффициентов a_k, b_k :

$$\begin{aligned}
 \alpha_1 a_1 - \lambda_1 b_1 &= 0, \\
 \lambda_1 b_1 - \lambda_2 b_2 &= 0, \\
 a_1 + b_1 x_1 - a_2 - b_2 x_1 &= 0, \\
 \lambda_2 b_2 - \lambda_3 b_3 &= 0, \\
 a_2 + b_2 x_2 - a_3 - b_3 x_2 &= 0, \\
 \lambda_3 b_3 - \lambda_4 b_4 &= 0, \\
 a_3 + b_3 x_3 - a_4 - b_4 x_3 &= 0, \\
 \alpha_4 a_4 + (\alpha_4 x_4 + \lambda_4) b_4 &= \alpha_4 T_{\text{ext}}
 \end{aligned} \tag{2.38}$$

Программа решения системы уравнений (2.35) приведена в приложении Д.

Результаты расчета четырехслойной панели при разности температур 10 К приведены на рисунке 2.12.

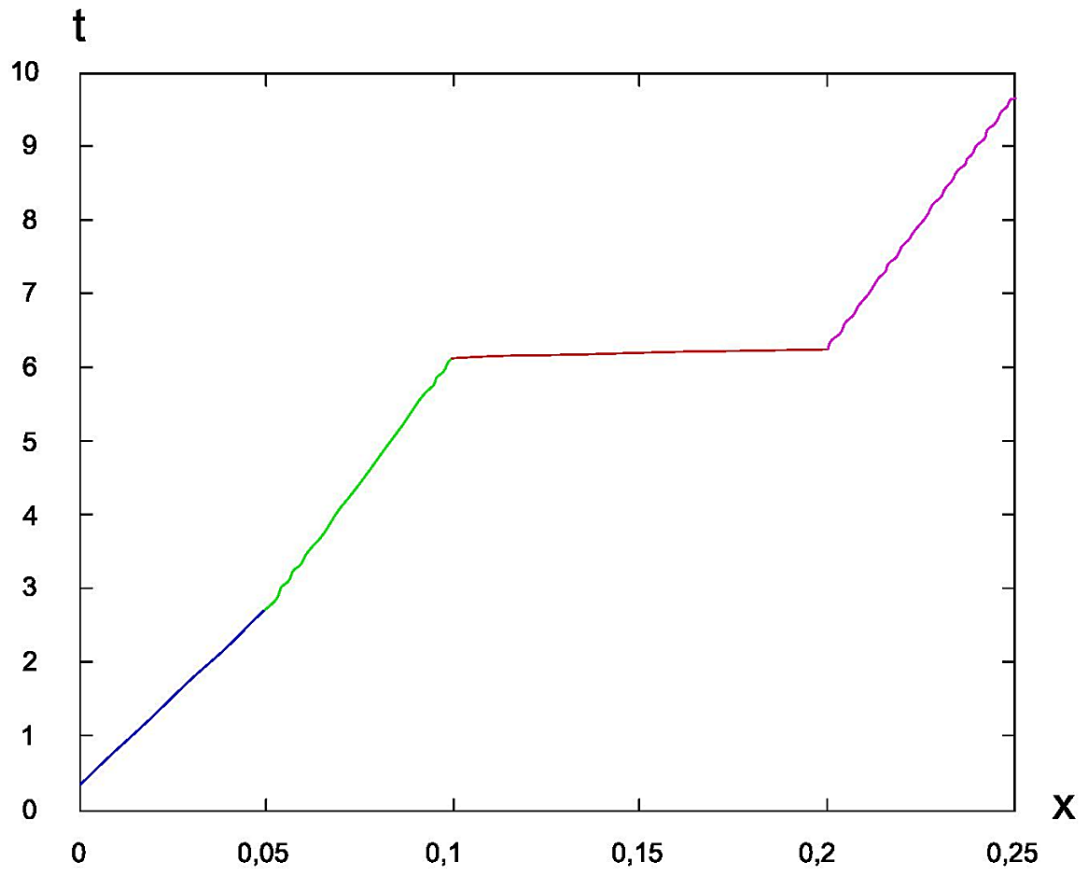


Рисунок 2.12. Результаты расчета распределения температуры в четырехслойной панели с постоянной внешней температурой

Последней задачей, требующей решения, является определение стационарного распределения температур при нулевых граничных условиях и постоянном поглощаемом тепловом потоке на границе слоев 3 и 4 воздуха с бетоном (рисунок 2.13). Граничные условия приводят в этом случае к системе уравнений

$$\alpha_1 a_1 - \lambda_1 b_1 = 0, \quad (2.39)$$

$$\lambda_1 b_1 - \lambda_2 b_2 = 0,$$

$$a_1 + b_1 x_1 - a_2 - b_2 x_1 = 0,$$

$$\lambda_2 b_2 - \lambda_3 b_3 = 0,$$

$$a_2 + b_2 x_2 - a_3 - b_3 x_2 = 0,$$

$$\lambda_3 b_3 - \lambda_4 b_4 = 1000,$$

$$a_3 + b_3 x_3 - a_4 - b_4 x_3 = 0,$$

$$\alpha_4 a_4 + (\alpha_4 x_4 + \lambda_4) b_4 = 0.$$

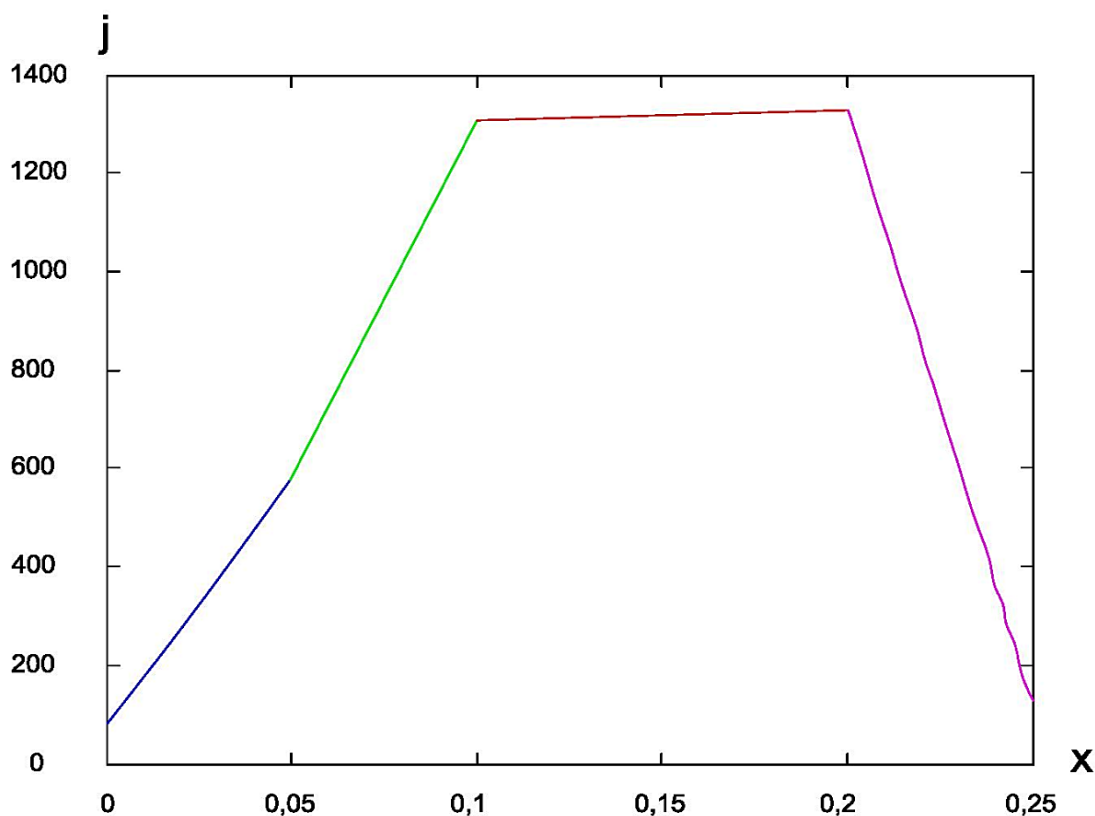


Рисунок 2.13. Результат расчета распределения температуры в четырехслойной панели с постоянным поглощаемым потоком энергии 1000 Вт/см^2

Результаты расчета показывают наличие практически полного прогрева бетонной стенки таким потоком.

Выводы по 2 главе

1. Математическое моделирование тепловых потоков в многослойной пассивной светопоглощающей панели приведено к совокупности двух стационарных и двух квазистационарных задач.

2. Решение стационарных задач описывается кусочно линейными зависимостями, коэффициенты которых находятся из граничных условий. Квазистационарные, т.е. установившиеся со временем колебания температуры, вызванные изменением наружной температуры или поглощаемой в панели солнечной радиацией, ищутся в виде суперпозиции тепловых волн.

3. Коэффициенты в полученных зависимостях, определяющие амплитуды и фазы колебаний в каждом слое, находятся путем введения

комплексных переменных. После этого значения коэффициентов определяются из системы линейных алгебраических уравнений, задаваемых граничными условиями.

4. Разработанный метод расчета допускает простое обобщение на произвольное количество слоев. Это позволяет определить тепловые режимы многослойных систем и выбирать для эффективной утилизации солнечной энергии оптимальные параметры стеновой панели.

Глава 3. Экспериментальное исследование стеновой солнечной панели

Архитектурные тенденции в градостроительстве все больше включают здания со светопрозрачными фасадами, которые наряду, с расчетной несущей нагрузкой, должны также отвечать высоким параметрам теплозащиты. Новые наружные ограждения требуют детального изучения и всестороннего исследования, так как способны пропускать существенное количество солнечной энергии, которая, несомненно, должна учитываться при теплофизических расчетах.

От теплотехнических качеств наружных ограждающих конструкций зданий зависят:

- количество тепловой энергии, расходуемой на отопление в зимний период;
- поддержание оптимальных и допустимых параметров микроклимата при достаточно резком изменении внешних условий;
- защита здания от переохлаждения и перегрева при экстремальных метеоусловиях;
- радиационная температура ограждений;
- возможность образования зон возможного промерзания, появление конденсата, крайне отрицательно влияющего на здоровье человека и техническое состояние строительных элементов.

В данной работе приводятся результаты экспериментальных исследований по определению коэффициента теплопроводности энергоактивной ограждающей конструкции и тепловых потоков, поступающих в помещение при утилизации солнечной энергии.

Так как температура наружного воздуха в течение суток может существенно изменяться, то нецелесообразно рассматривать процессы теплопроводности и изменения тепловых потоков в течение суток. Так же для определения точных эксплуатационных характеристик ограждений необходимо длительное наблюдение в течение отопительного сезона. При распространении

теплоты в слое наружного ограждения коэффициент температуропроводности является важнейшей теплофизической характеристикой, позволяющей найти тепловую инерцию внешних строительных конструкции зданий и сооружений. Например, если произвести увеличение значения объемной теплоемкости коэффициент температуропроводности уменьшается что показывает значительное аккумулирование теплоты в слое за время нагрева и незначительное влияние температурных волн. При высоком значении коэффициента теплоусвоения нагрузка на инженерные системы обеспечения микроклимата будет компенсироваться энергией, накопленной наружными ограждениями здания, а температура воздуха и радиационная температура внутри помещения будет практически постоянной, без существенных колебаний во времени.

3.1. Методика проведения экспериментальных исследований

Для определения плотностей тепловых потоков ограждающих конструкций целесообразно использовать ГОСТ 25380-2014 «Здания и сооружения. Методика определения плотности тепловых потоков, проходящих через наружные ограждающие конструкции» [77]. Указанный ГОСТ позволяет определить эксплуатационные теплотехнические характеристики ограждающих конструкций. Данный метод измерения плотности теплового потока основан на измерении перепада температуры на «дополнительной стенке» (пластинке), устанавливаемой на ограждающей конструкции здания. Плотность теплового потока определялась при помощи прибора ИТП - МГ4.03 «Поток», имеющего государственную поверку и включенного в государственный реестр средств измерения.

При проведении экспериментальных исследований датчики устанавливались на испытуемую конструкцию на равном удалении друг от друга для получения максимально достоверного результата. Выбранные участки для измерений имели одинаковые условия по лучистому теплообмену и не находились в непосредственной близости от источников тепловой энергии,

способных повлиять на направление и значение теплового потока. Места установки регистраторов теплового потока были предварительно очищены от грязи и жира для обеспечения достоверности эксперимента. Преобразователь плотно прижимается по всей его поверхности к ограждающей конструкции и закрепляется, обеспечивая постоянный контакт преобразователя теплового потока с поверхностью исследуемых участков в течение всех последующих измерений. Регистрация тепловых потоков происходит в память устройства, для того чтобы исключить влияние теплоты от человека на результаты эксперимента.

Измерение плотности теплового потока проводят: при использовании прибора ИТП-МГ 4.03 «Поток» после восстановления условий теплообмена в помещении вблизи контрольных участков ограждающих конструкций, искаженных при выполнении подготовительных операций, и после восстановления непосредственно на исследуемом участке прежнего режима теплообмена, нарушенного при креплении преобразователей; при теплотехнических испытаниях с использованием преобразователей теплового потока после наступления установившегося теплообмена под преобразователем. После подготовки поверхности, крепления датчиков и установки прибора для регистрации параметров стационарный режим устанавливается через 5-10 минут. Для того чтобы понять, что стационарный режим установился и можно проводить измерения, следует считать приблизительную повторяемость результатов измерения плотности тепловых потоков в пределах установленной погрешности измерения.

При использовании приборов ИТП-МГ 4.03 «Поток» значения плотности теплового потока в Вт/м^2 показываются на экране, а также заносятся в память устройства для дальнейшей обработки и анализа. Принципиальная схема представлена на рисунке 3.1.

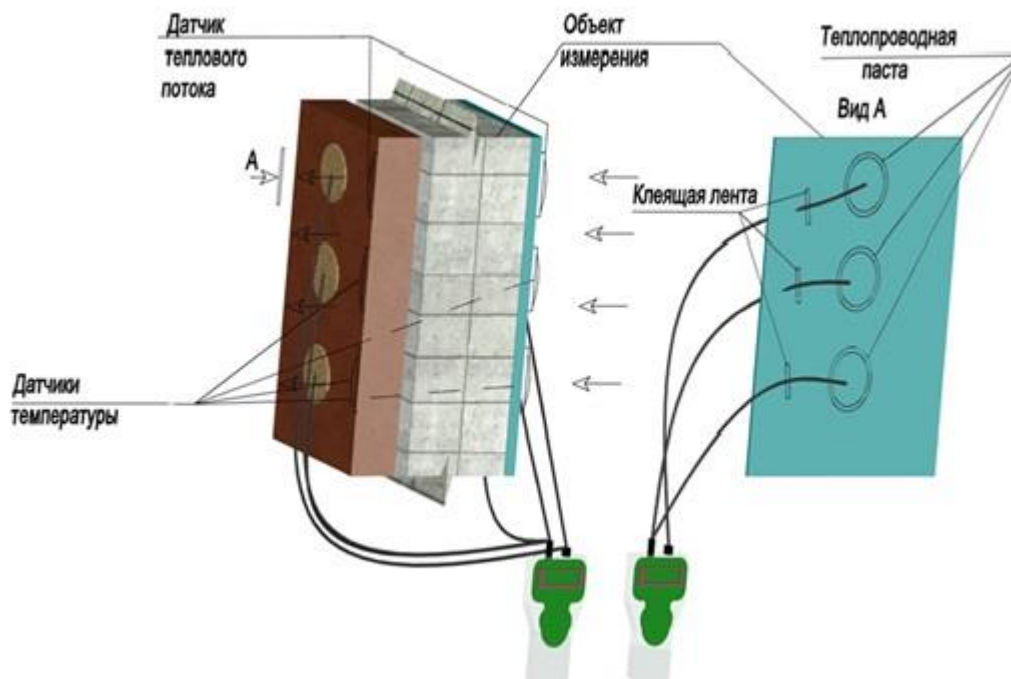


Рисунок 3.1. Схема исследования

Методика неразрушающего контроля, основанная на измерении температур на наружной и внутренней поверхности здания и измерении плотности теплового потока на наружной поверхности здания, позволяет определять весь комплекс теплофизических свойств материала ограждения здания:

– коэффициент теплопроводности λ при использовании закона теплопроводности Фурье определяется по формуле

$$\lambda = (q_{\text{п}}^{\text{max}} \delta) / (T_{\text{п1}} - T_{\text{п2}}) \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)} \quad (3.1)$$

- объемную теплоемкость c_p ;
- коэффициент температуропроводности a ;
- коэффициент теплоусвоения S ;
- тепловую инерцию d .

Методика комплексного определения коэффициентов теплопроводности, температуропроводности, объемной теплоемкости, термического сопротивления, теплоусвоения и тепловой инерции ограждений зданий,

строительных и теплоизоляционных материалов по тепловым и температурным измерениям на поверхности ограждения здания в течение одного опыта методом неразрушающего контроля имеет значительное преимущество по сравнению с известными ранее методами и способами:

- возможность проведения исследований в эксплуатационном режиме;
- в процессе теплообмена учитывается как конвективная, так и лучистая составляющая;
- при проведении эксперимента не учитываются теплопотери с окружающей средой;
- проведение измерений не вносит изменений в конструкцию и целостность строительных ограждений.

Перечисленные преимущества существенно упрощают экспериментальную установку и само исследование, а также повышают степень достоверности измерений.

3.2. Приборы и средства измерений

Для проведения экспериментальных исследований был использован измеритель плотности теплового потока и температуры ИТП-МГ4.03/Х(III) «Поток». Данный прибор предназначен для определения плотности теплового потока наружных ограждений зданий различного назначения, а также температур поверхностей, через которые проводят измерения.

Область применения данного устройства довольно обширна и разнообразна. В первую очередь это исследование процессов теплопередачи в различных средах, определение теплотехнических характеристик наружных ограждений зданий и сооружений, оценка энергетической эффективности и тепловой защиты объектов строительства и ЖКХ в соответствии с ГОСТ 25380 [77], ГОСТ 26254 [78] и ГОСТ 26602.1 [79]. Основные метрологические и технические характеристики прибора представлены в таблице 3.1

Таблица 3.1

Характеристики ИТП-МГ4.03/Х(III) «Поток»

Наименование	Значение
Интервал диапазона плотности теплового потока, Вт/м ²	10 до 999
Интервал диапазона температуры, °С	-30 до 100
Предел погрешности для теплового потока	6%
Предел погрешности температуры, °С	0,2 до 0,5
Величина дополнительной погрешности теплового потока, связанная с существенным перепадом температур	0,5%
Коэффициент преобразования датчиков теплового потока, Вт/(м ² ·мВ), не более	50
Потребляемая мощность, Вт, не более	0,25
Габаритные размеры, мм, не более: – электронный блок – датчик температуры – датчик теплового потока (прямоугольный)* – датчик теплового потока (круглый)	175×90×30, диаметр 12×3 от 10×10×1 до 100×100×3 от 18×1,5 до 100×3
Масса, кг	0,65

Идентификационные данные программного обеспечения (ПО) приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2

Программное обеспечение ИТП-МГ4.03/Х(III) «Поток»

Наименование ПО	Идентификационное наименование ПО	Номер версии ПО (идентификационный номер)	Цифровой идентификатор ПО (контрольная сумма исполняемого кода)	Алгоритм вычисления цифрового идентификатора
ИТР_МГ4	ИТР_МГ4 V1.01	V1.01	0xD7B5	CRC16

Измеритель состоит из электронного блока, датчиков теплового потока в количестве от одного до трех и двух датчиков температуры [80]. Датчики теплового потока соединены кабелем непосредственно с электронным блоком, датчики температуры подсоединяются кабелем с электронным блоком через разъемное соединение. Общий вид измерителя представлен на рисунке 3.2



Рисунок 3.2. Внешний вид измерителя плотности теплового потока и температуры ИТП-МГ4.03/5(III) «Поток»:

1 – электронный блок; 2 – датчик теплового потока; 3 – датчик температуры; 4 – разъем для подключения датчиков температуры.

Работа прибора основывается на измерении термической электродвижущей силы при помощи контактных термоэлектрических датчиков теплового потока и сопротивления датчиков температуры [81].

Микропроцессорное устройство измерителя осуществляет преобразование полученных сигналов в плотность теплового потока и в температуру, отображая

их на дисплее электронного блока, сохраняя результаты измерений в памяти измерителя и передавая их в ПК.

Датчики теплового потока представляют собой гальваническую медьконстантановую термобатарейку из нескольких сот последовательно соединенных термопар. Датчик имеет два вывода (по одному от каждого конца чувствительного элемента). Он работает благодаря тесному и плотному контакту на одной из обследуемых поверхностей, таким образом создается дополнительный слой [82]. Тепловая волна, прошедшая через ограждение, создает в закреплённом датчике градиент температур и вызывает электрический сигнал, регистрируемый вычислителем. Плотность теплового потока в данном процессе (q) вычисляется по формуле:

$$q=K \cdot E, \quad (3.2)$$

где q – плотность теплового потока, Вт/м²; K – коэффициент преобразования, Вт/(м²·мВ); E - величина термоэлектрического сигнала, мВ.

Для измерения температуры используют платиновые термодатчики, герметично запаиваемые в металлическую пластину. Для проведения замеров один из датчиков, предназначенный для измерения температуры поверхности, непосредственно закрепляется на исследуемой поверхности, второй датчик размещается в воздушной среде.

Электронный блок включает в себя схемы измерения и регистрации теплового потока и температуры, а также отображения результатов измерений на дисплее [83].

3.3. Устройство экспериментальной модели здания

Для проверки основных теоретических предложений и зависимостей был смонтирован экспериментальный «дом». Собранный конструкцией позволяет исследовать теплофизические свойства ограждающих конструкций. Модель здания состоит из 2-х малых помещений: основного и тамбура. Основным материалом для строительства – СИП панели толщиной 174 мм (рисунке 3.3). СИП панели - это один из видов многослойных конструкций, устроенных по типу

"сэндвич", в которых теплоизолирующий материал находится между двух одинаковых по размеру древесных плит. Они предназначены для строительства малоэтажных зданий жилого, общественного и промышленного назначения (коттеджи, поликлиники, торговые павильоны, кафе, гостиницы, бытовки, склады, гаражи).

Наружный и внутренний слой СИП панели выполняются из ориентированно стружечной плиты (ОСП). В качестве теплоизоляционного слоя, как правило, используется пенополистирол, пенополиуретан, полиизоцианурат, фенолформальдегидный пенопласт ФРП-1, минеральная и базальтовая вата, соединение слоев между собой производится посредством клея, а повышение несущей способности - посредством деревянного бруса.



Рисунок 3.3. Общий вид СИП панели

Для поддержания температуры внутреннего воздуха смонтирована система электрического отопления с возможностью регулирования температуры в интервале от 18 до 22 °С.

В качестве источника теплоты использован инфракрасный обогреватель Ballu BIN-AP-3.0 (рисунок 3.4).



Рисунок 3.4. Инфракрасный обогреватель Ballu

Источник энергии представляет собой отопительный прибор обогревающий помещение при помощи инфракрасного излучения. Сферой применения данного устройства является обогрев как в качестве основного источника тепла, так и в качестве дополнительного в промышленных, производственных, бытовых и жилых помещениях. Обогрев помещения протекает по следующей схеме. Инфракрасное излучение нагревает внутреннюю поверхность наружных ограждений, а также предметы, находящиеся в помещении, которые путем теплопередачи нагревают воздух в помещении. Наличие теплого воздуха обеспечивает движение воздушной массы в обогреваемой комнате, при этом перепад температуры не превышает двух градусов. Предложенный вид отопления при эксплуатации имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными отопительными системами:

- минимальный перепад между радиационной температурой поверхностей и температурой воздуха;
- сниженные затраты на электроэнергию.

Основная часть отопительного прибора представляет собой корпус (рисунок 3.5), на котором расположены алюминиевые излучатели. Термоэлектрический нагревательный элемент расположен с обратной стороны панелей (ТЭН). Электрообогреватель подключается к электрической сети здания. Принцип работы заключен в следующем: при включении цепи питания

электрический ток поступает на нагревательный элемент, повышая его температуру, и нагретые панели испускают направленное инфракрасное излучение. При таком способе теплопередачи радиационная температура поверхности предметов будет отличаться и зависеть от ряда физических параметров.

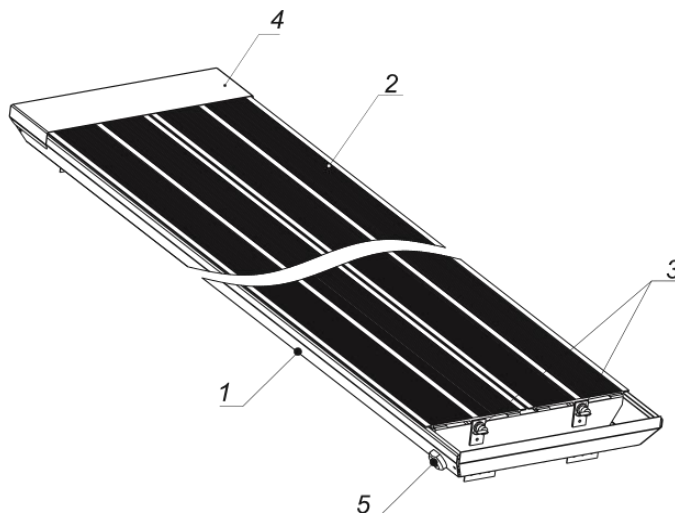


Рисунок 3.5. Конструкция инфракрасного излучателя.
1– корпус; 2 – излучающая панель; 3– электронагреватель трубчатый; 4 – крышка;
5 – кабельный ввод

Для обеспечения стационарного температурного режима установлен термостат механический ВМТ-1 (рисунок 3.6).

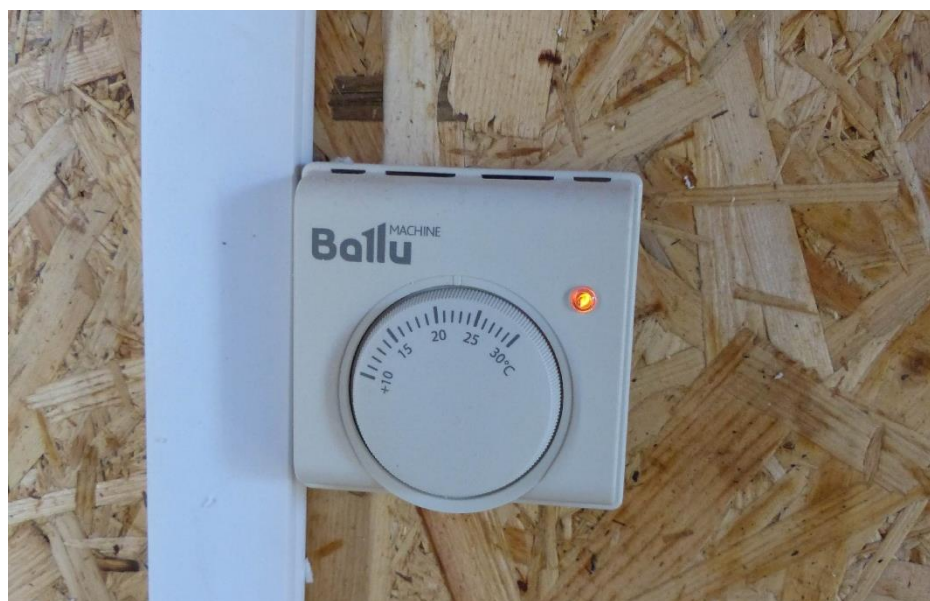


Рисунок 3.6 Термостат механический ВМТ-1

Основное предназначение термостата – установка и поддержание требуемой температуры воздуха в помещении. В качестве регулирующего элемента используется сильфон, заполненный газом.

Соппротивление наружных ограждений экспериментального здания соответствует нормируемым значениям для г. Воронеж согласно СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий», актуализированная редакция СНиП 23-02-2003, которое для наружных стен должно быть не менее $3,12 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)}/\text{Вт}$.

В экспериментальном здании наружная стена состоит из СИП плиты толщиной 174 мм, которая включает пенопласт толщиной 150 мм с облицовкой с двух сторон ОСП плитами толщиной 22 мм каждая, с внешней стороны имеется воздушная прослойка и отделка сайдингом (вагонка). Для расчета сопротивления теплопередачи наружной стены здания не учитывался облицовочный материал фасада, т.к. при строительстве жилья эконом класса он может быть заменен стойкими к атмосферному воздействию лакокрасочными покрытиями. Коэффициент теплопроводности для ОСП плиты составляет $0,15 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$; для пенопласта ПСБ-С-25 $0,041 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$.

Выполненный расчет сопротивления теплопередачи по формуле

$$R_0 = \frac{1}{\alpha_{\text{в}}} + R_{\text{к}} + \frac{1}{\alpha_{\text{н}}} \quad (3.3)$$

показал, что конструкции из СИП панелей полностью удовлетворяют требованиям по тепловой защите т.к. $R_0 = 4,1 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)}/\text{Вт}$ где $\alpha_{\text{в}}$ – коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающей конструкции. В формуле (3.3) $\alpha_{\text{н}}$ - коэффициент теплоотдачи наружной поверхности ограждающей конструкции; $R_{\text{к}}$ – сопротивление теплопередачи ограждающей конструкции.

Для Воронежской области средняя температура отопительного периода при его продолжительности 190 суток составляет $-2,5 \text{ °C}$. Градосутки отопительного периода с учетом принятой температуры внутреннего воздуха 20 °C , определяемые по формуле

$$\text{ГСОП} = (t_{\text{в}} - t_{\text{от}}) \cdot z_{\text{от}}, \quad (3.4)$$

составляют $4465 \text{ °C} \cdot \text{сут}$.

В формуле (3.4) t_v – температура воздуха внутри помещения, °C; $t_{от}$ – средняя температура наружного воздуха за отопительный период; $Z_{от}$ – продолжительность отопительного периода, сут.

Удельная теплозащитная характеристика экспериментального здания $k_{об}$ в Вт/(м³·°C) рассчитывалась по выражению:

$$k_{об} = \frac{1}{V_{от}} \sum_i \left(n_{t,i} \frac{A_{\phi,i}}{R_{o,i}^{пр}} \right) = K_{комп} \cdot K_{общ}, \quad (3.5)$$

где $R_{o,i}^{пр}$ – приведенное сопротивление теплопередачи i -го фрагмента теплозащитной оболочки здания, (м²·°C/Вт); $A_{\phi,i}$ – площадь соответствующего фрагмента теплозащитной оболочки здания, м²; $V_{от}$ – отапливаемый объем здания, м³; $n_{t,i}$ – коэффициент учитывающий отличие внутренней или наружной температуры у конструкции от принятых в расчете ГСОП; $k_{общ}$ – общий коэффициент теплопередачи здания, Вт/(м²·°C), рассчитываемый по формуле

$$K_{общ} = \frac{1}{A_{н}^{сум}} \sum_i \left(n_{t,i} \frac{A_{\phi,i}}{R_{o,i}^{пр}} \right), \quad (3.6)$$

где $K_{комп}$ – коэффициент компактности здания, м⁻¹, определяемый из соотношения; $A_{от}^{сум}$ – сумма площадей по внутреннему обмеру всех наружных ограждений теплозащитной оболочки здания, м².

$$K_{комп} = \frac{A_{н}^{сум}}{V_{от}}. \quad (3.7)$$

Поскольку ограждающие конструкции исследуемого здания выполнены из СИП панелей и все образованное пространство является жилым с температурой внутреннего воздуха 20 °C, то площадь ограждающих конструкций равна 16 м², при этом объем здания составляет 10 м³. Исходные и промежуточные расчетные параметры для определения удельной тепловой характеристики здания приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3

Данные для расчета удельной теплозащитной характеристики здания

Наименование фрагмента	$n_{t,i}$	$A_{\Phi,i}$, м ²	$R_{o,i}^{np}$, (м ² · °С)/Вт	$n_{t,i} A_{\Phi,i} / R_{o,i}^{np}$, Вт/°С	%
Ограждающие конструкции СИП	1	16	4,1	42,96	96
Окна	1	3	0,81	6,15	3
Двери	1	1,89	0,88	2,15	1
Сумма	-	-	-	51,26	100

Значения коэффициентов κ и $\kappa^{тр}$ определяются по формулам 3.8, 3.9:

$$\kappa = \frac{1}{V} \cdot \frac{n_t \cdot A_i}{R} \quad (3.8)$$

$$\kappa^{тр} = \frac{4,74}{0,00013 \cdot ГСОП + 0,61} \cdot \frac{1}{\sqrt[3]{V_{от}}} \quad (3.9)$$

Т.к. расчетное значение удельной теплозащитной характеристики здания меньше нормируемого $\kappa^{тр}$, то комплексное требование по тепловой защите выполнено.

Разработанная модель экспериментального здания схематично представлена на рисунке 3.7.

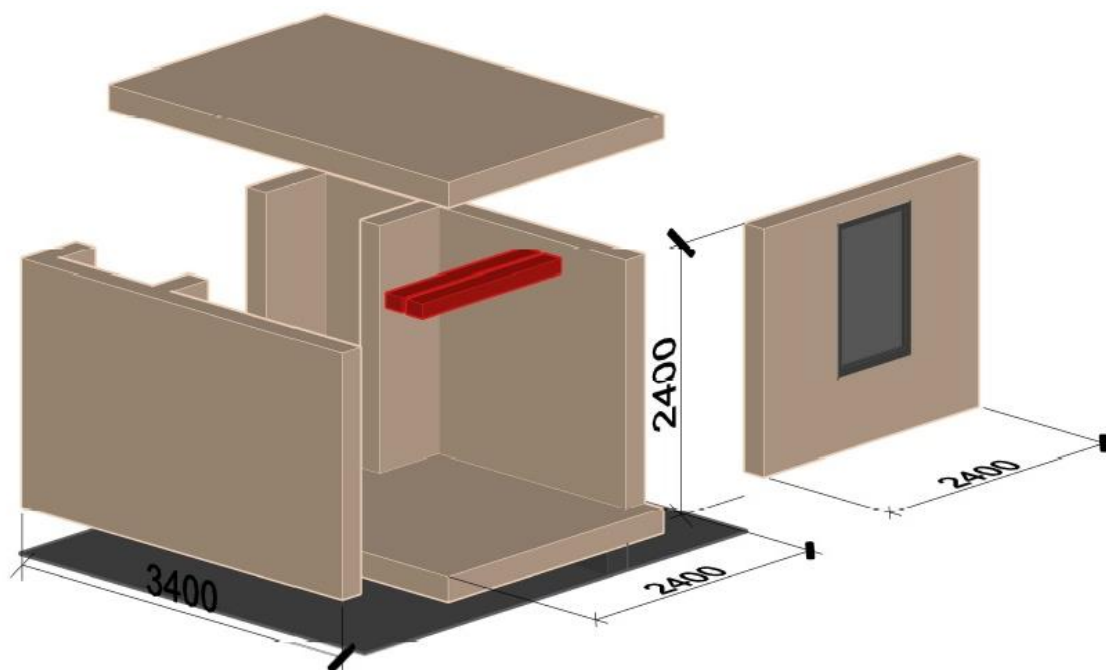


Рисунок 3.7 Модель экспериментального дома

На рисунке 3.7 представлена трехмерная модель экспериментального дома. На изображении видны составные элементы здания, место установки отопительного прибора и испытуемого ограждения.

3.4. Планирование эксперимента

Проведенные экспериментальные исследования классифицируются как натурные. Проверяются предложенные закономерности аккумулирования солнечной энергии ограждениями на испытательном полигоне. По характеру постановки задачи эксперимент рассчитан на исследование аккумулирования солнечной энергии при большом количестве известных исходных факторов, включая климатические условия Воронежской области, влияющие на протекание процесса. По способу проведения эксперимент является пассивным, т.е. метеозависимым, и основывается на регистрации параметров теплового потока, проходящего через ограждение, характеризующего энергоэффективность объекта исследования. Вмешательство в эксперимент в процессе его проведения сторонних факторов практически исключено.

Обработка полученных данных осуществлялась после окончания экспериментальных исследований [84,85,86,87].

3.5. Результаты проведения экспериментальных исследований

Экспериментальное здание находится на полигоне Воронежского государственного технического университета в достаточном удалении от других зданий, а также инженерных систем, способных оказывать воздействия на результаты эксперимента. Для определения теплофизических характеристик предложенной энергоактивной панели за остеклением была смонтирована исследуемая конструкция.

Замеры производились в течение отопительного периода. Дата начала исследований 5 декабря 2016 г. – окончание 29 апреля 2017 г. На рисунке 3.8. представлена фотография экспериментального здания с установленными датчиками на светопрозрачной панели.



Рисунок 3.8. Общий вид здания при проведении замеров

Для проведения исследований была выполнена четырехслойная конструкция панели, включающая утеплитель, воздушную прослойку, бетон и слой воздуха до светопрозрачного ограждения. Слои перечислены в направлении из помещения наружу. Первый слой представляет собой тепловую изоляцию из минеральной ваты толщиной 5 см, второй слой – воздушная прослойка толщиной 5 см, третий слой – железобетонная стенка толщиной 10 см, четвертый слой – внешний воздушный промежуток толщиной 5 см, отделенный от окружающей среды пропускающим свет стеклом. Параметры исследуемой панели приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4

Параметры панели

Среда	Плотность, $\text{кг} / \text{м}^3$	Теплоемкость, $\text{кДж} / (\text{кг} \cdot \text{K})$	Теплопроводность, $\text{Вт} / (\text{м} \cdot \text{K})$
Пенобетон	600	0,84	0,14
Минеральная вата	158	0,84	0,037
Бетон	2200	0,84	1,55
Воздух	1,166	1	0,0258

На внутренней и наружной поверхности, согласно вышеизложенной методике, установлены датчики, фиксирующие температуру и тепловой поток. Результаты записываются каждый час в память устройства. Фиксация результатов измерения производилась в автоматическом режиме прибором ИТП МГ-4.03 «Поток». На рисунке 3.9 представлена фотосъемка проведения эксперимента и работы прибора, в таблице 3.5 значения тепловых потоков одной серии измерений.

Таблица 3.5

Определение значений по серии измерений прибором ИТП-МГ 4.03 Поток 17 января 2017 г.

	$q_1, \text{Вт/м}^2$	$q_2, \text{Вт/м}^2$	$q_3, \text{Вт/м}^2$	$q_{\text{ср}}, \text{Вт/м}^2$	$t_{\text{нар.}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{вн.}}, ^\circ\text{C}$
Факт	32.5	34.5	35.5	34.16	-12.35	19.45
Мат. Модель	34	35.5	36	35,16	-12.35	19.45



Рисунок 3.9. Фиксация результатов измерений

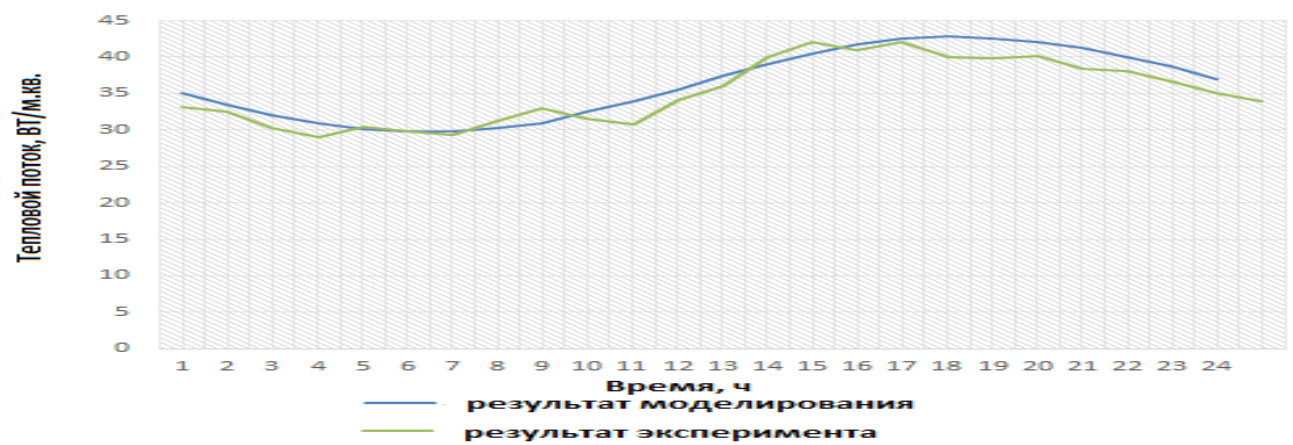


Рисунок 3.10.а. Сравнение результатов, 17 января 2017 г.

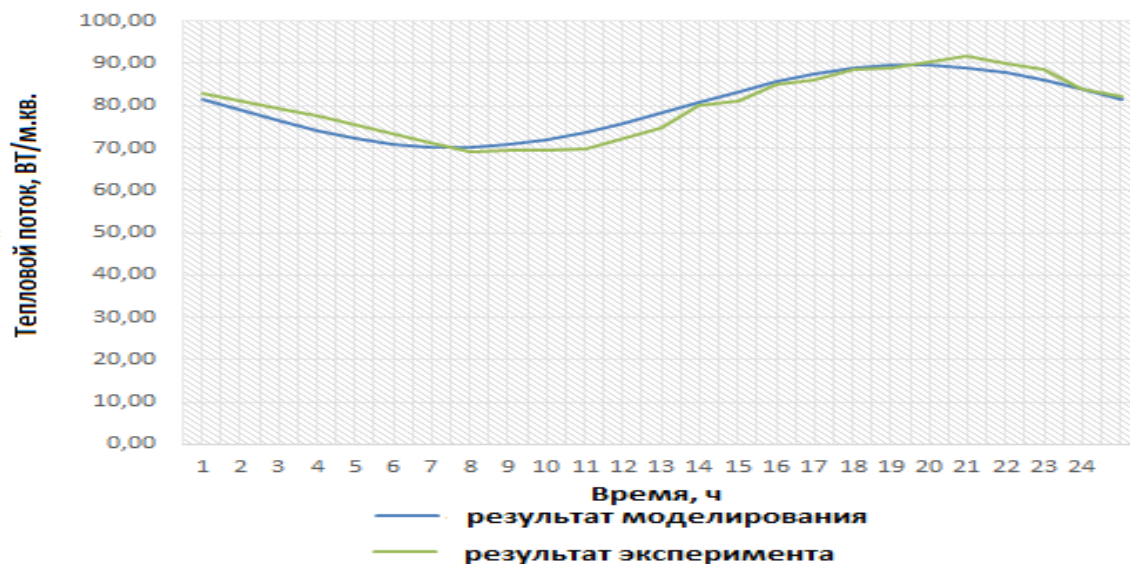


Рисунок 3.10.б. Сравнение результатов, 15 февраля 2017 г.

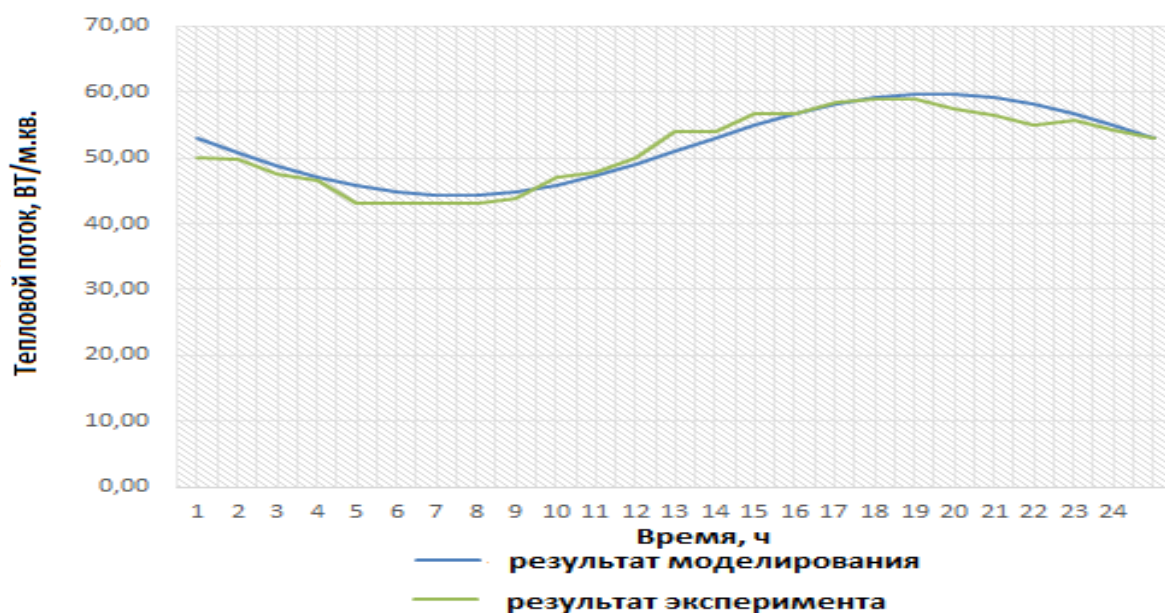


Рисунок 3.10.в. Сравнение результатов, 11 марта 2017 г.

Полученные значения при экспериментальных исследованиях целесообразно сопоставить с результатами математического моделирования. Так для января 2017 г. графическое изображение результатов на рисунке 3.10 показывает их незначительное расхождение. Допущением будет являться величина солнечной радиации. Условно считаем ее одинаковой для фактических и расчётных результатов.

3.6. Оценка достоверности полученных данных

Достоверность полученных экспериментальных данных согласно [88], оценивается по их воспроизводимости, полученной серии замеров. При оценке достоверности полученных результатов производились вычисления следующих показателей. Среднеарифметическое значение определяемого параметра (тепловой поток) X_i при числе повторений n ($n < 30$)

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^n \frac{X_i}{n}. \quad (3.11)$$

Величина погрешности (отклонения) для рассматриваемого измерения

$$\Delta_i = X_i - \bar{X}. \quad (3.12)$$

Величина среднеарифметической погрешность серии измерений

$$\bar{\Delta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\Delta_i|. \quad (3.13)$$

Относительная погрешность измерений серии опытов

$$\delta = \frac{\bar{\Delta}}{\bar{X}} 100. \quad (3.14)$$

Величина среднеквадратичной ошибки (среднеквадратичного отклонения) серии опытов

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i^2}{n-1}}. \quad (3.15)$$

Величина ошибки серии опытов

$$m = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}. \quad (3.16)$$

Погрешность серии опытов с числом степеней свободы $\nu = n-1$ при требовании надежности измерений $\beta = 0,95$ и показатели надежности $T = 3.2$

$$a = m \cdot T. \quad (3.17)$$

Коэффициент вариации серии опытов

$$k_i = \frac{\delta}{\bar{X}}. \quad (3.18)$$

Коэффициент вариации во всех случаях не более 5%, что свидетельствует о правдивости и точности полученных результатов [89,90,91,92,93,94].

3.7. Разработка энергоэффективных наружных ограждений

Полученные теоретические сведения, а также их экспериментальное подтверждение позволили разработать энергоэффективную наружную ограждающую конструкцию.

Предлагаемый солнечный тепловой коллектор (рисунки 3.11, 3.12)

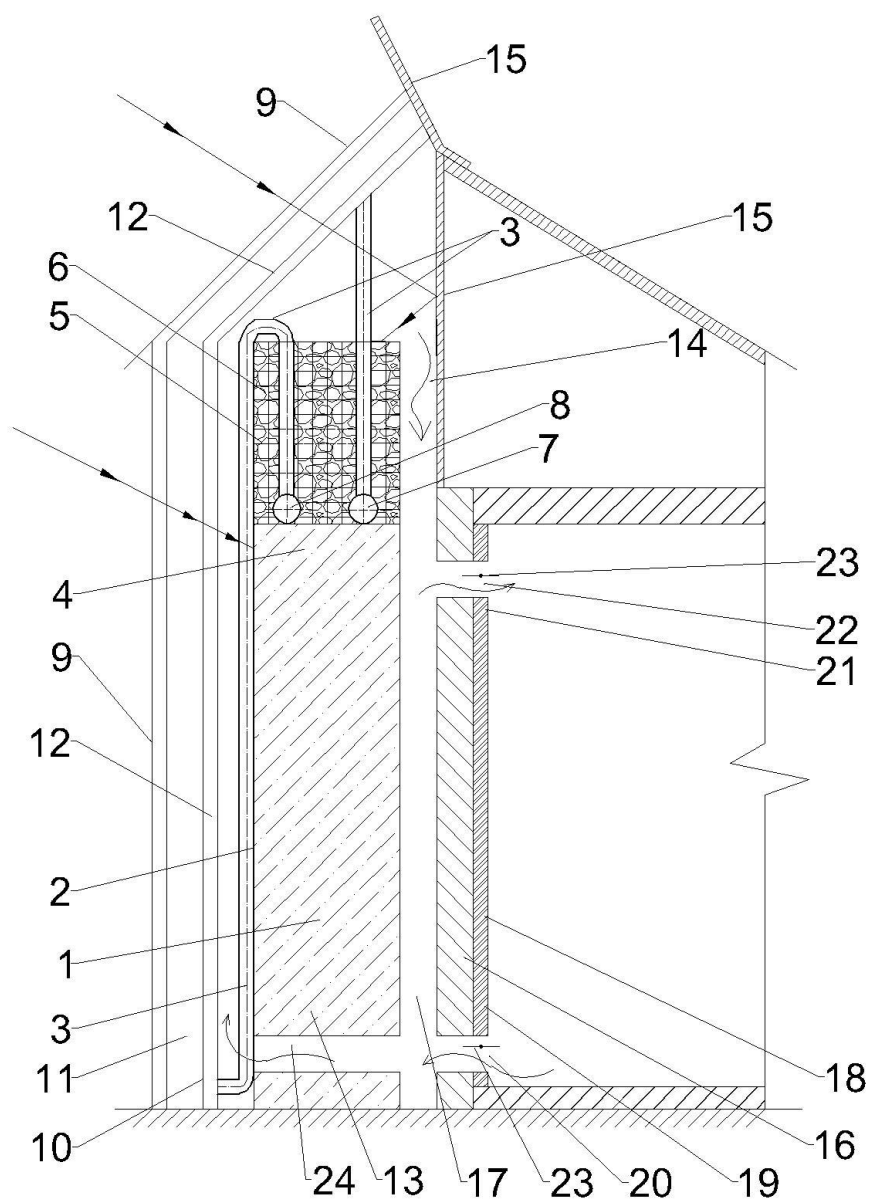


Рисунок 3.11. Солнечный тепловой коллектор

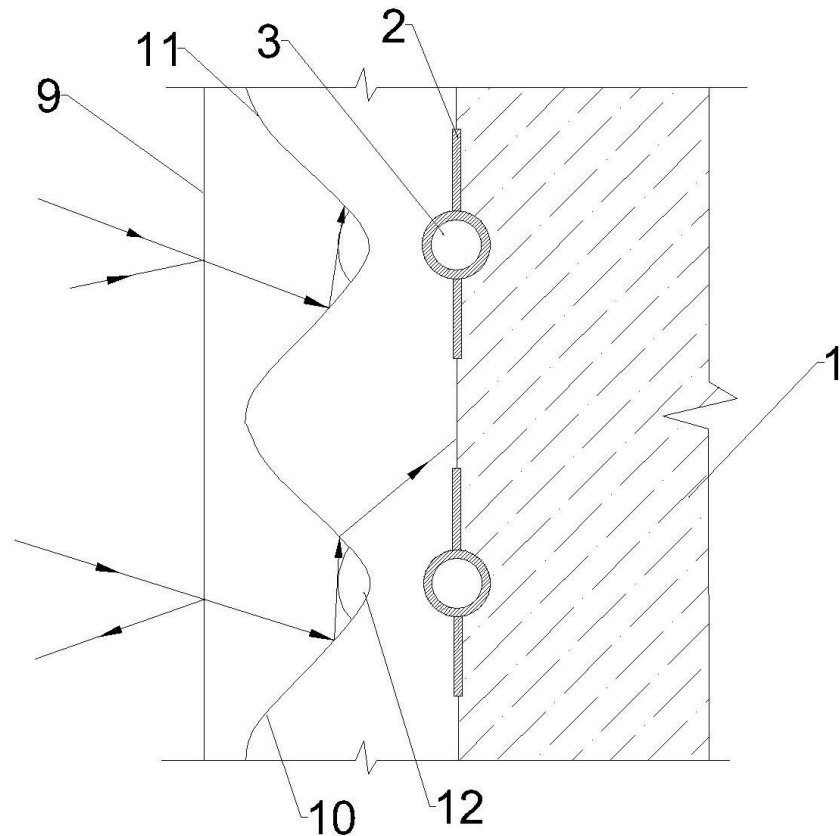


Рисунок 3.12. Разрез предлагаемой стеновой панели

Солнечный тепловой коллектор состоит из стеновой панели 1, на которой закреплены поглощающие пластины 2 и поглощающие трубы 3. В верхней части 4 стеновой панели 1, которая может быть выполнена из железобетонной, расположена структурная решетка 5, заполненная аккумулярующим насыпным материалом 6. Стеновая панель 1 может быть выполнена полностью из насыпного аккумулярующего материала 6, заключенного в структурную решетку 5. В качестве насыпного материала 6 может быть использован гравий, так как аккумулярующая способность одного кубического метра превышает ту же удельную величину для бетонов в 2 раза. В насыпной материал 6 погружены распределительная 7 и сборная 8 трубы, к которым подключены поглощающие трубы 3. Стеновая панель имеет наружные ограждения в виде светопрозрачного покрытия 9. Под светопрозрачным покрытием 9 размещена гофрированная панель 10, состоящая из светопрозрачных параболических пластин 11 и жидкостных линз 12. Поглощающие трубы 3 установлены соосно с

жидкостными линзами 12 на стеновой панели 1, а также сообщены с ними в ее верхней 4 и нижней 13 частях. За аккумулярующим материалом 6 в его теневой зоне 14 расположены, в том числе и возвышаясь над ним, пластинчатые отражатели 15. Тепловая изоляция 16 закреплена с зазором 17 от стеновой панели 1 на облицовочной панели 18, в нижней части которой 19 выполнены входные отверстия 20, а в верхней 21 - выходные 22 для воздуха. Во входных 20 и выходных 22 отверстиях расположены клапаны 23. В нижней части стеновой панели 13 выполнены перепускные отверстия 24 для воздуха.

Солнечный тепловой коллектор работает следующим образом.

По распределительной трубе 7 теплоноситель подается в поглощающие трубы 3, которые погружены в насыпном материале 6 и направлены к жидкостным линзам 12 гофрированной панели 10. Теплоноситель поступает в жидкостные линзы 12, где нагревается за счет воздействия солнечной радиации, прошедшей через светопрозрачное покрытие 9 и многократно отраженной от поверхности светопрозрачных параболических отражателей 11 для концентрирования излучения. После протекания по жидкостным линзам 12 гофрированной панели 10 теплоноситель поступает в короткие горизонтальные участки поглощающих труб 3, переходящие в нижней части 13 стеновой панели 1 в вертикальное положение. Размещение на стеновой панели 1 поглощающих пластин 2 с трубами 3 соосно жидкостным линзам 12 способствует концентрации излучения посредством параболических отражателей 11 в зоны их расположения, что повышает энергооблученность и тем самым увеличивает температуру теплоносителя. При достижении в верхней части 4 насыпного аккумулярующего материала 6 теплоноситель направляется по поглощающим трубам 3 в его слой к расположенной в нем сборной трубе 8, а затем к потребителю.

Прошедшее сквозь светопрозрачное покрытие 9, гофрированную панель 10 и не поглощенное теплоносителем в жидкостных линзах 12 солнечное излучение преобразуется в тепловую энергию в стеновой панели 1 и насыпном аккумулярующем материале 6. В холодный период года, когда температура

стенной панели 1 и насыпного аккумулирующего материала 6 под воздействием солнечной радиации превышает температуру внутреннего воздуха помещений, клапаны 23 во входных 20 и выходных 22 отверстиях облицовочной панели 18 открыты. Воздух проходит через входные отверстия 20, а затем через перепускные отверстия 24 поступает в зазор между гофрированной 10 и стеновой 1 панелями. Контактируя с облучаемой поверхностью стеновой панели 1, воздух нагревается и поднимается вверх, где проходит через слой аккумулирующего материала 6, на который дополнительно посредством пластинчатых отражателей 15 направляется излучение. После прогрева в насыпном аккумулирующем материале 6 теплый воздух через выходные отверстия 22 поступает в помещения. Если температура стеновой панели 1 и насыпного аккумулирующего материала 6 в холодный период года ниже температуры внутреннего воздуха помещений, то клапаны 23 полностью перекрывают сечение входных 20 и выходных 22 отверстий, а тепловая изоляция 16 на облицовочной панели 18 существенно снижает теплопотери в окружающую среду.

Конструкция солнечного теплового коллектора позволяет при интенсивной солнечной радиации нагреть жидкий теплоноситель до требуемой температуры для потребителя. В отопительный период при ограниченных ресурсах солнечного излучения происходит его преобразование в тепловую энергию стеновой панели и насыпного аккумулирующего материала, за счет которой осуществляется нагревание воздуха, в последствии направляемого в отапливаемые помещения. Данный способ пассивной утилизации позволяет использовать солнечную радиацию при низких показателях ее интенсивности, характерных для холодного периода года, что в конечном итоге приводит к повышению эффективности улавливания излучения и расширению сезона эксплуатации предложенного устройства до круглогодичного.

3.8. Анализ разработанной наружной ограждающей конструкции для различных климатических зон

Для проверки практических и теоретических предположений воспользуемся прикладной программой Temper-3D 6. Это графическая программа для вычисления полей температур ограждающих конструкций методом конечных элементов. В качестве конечного элемента используется восьмиузловой изопараметрический конечный элемент с трилинейным распределением температуры. Максимально возможное количество узлов конечно-элементной сети до 8 млн.

Вычисления в Temper-3D дают возможность определить: вид и толщину утеплителя, закладываемого в наружное ограждение с отсутствием его промерзания; значение термического сопротивления целой конструкции, необходимого в дальнейшем для определения мощности отопительных приборов; температуру в каждой части конструкции; наличие или отсутствие конденсата на поверхности наружного ограждения.

Как известно, при энергоэффективном проектировании необходимо утепление для отсутствия промерзания стен. Отсюда вытекает целый ряд вопросов о точной его толщине и виде, которые позволят предотвратить негативные последствия, в том числе образования влаги внутри стен и т.д.

Анализ разработанной четырехслойной наружной ограждающей конструкции выполнялся на примере моделирования стены в программе Temper. Ограждение «помещается» в климатические условия трех городов: Сочи, Воронеж, Архангельск. Исходные данные для внесения в программу приведены в таблице 3.6 и таблице 3.7. Вариант исследуемой конструкции показан на рисунке 3.13.

Таблица 3.6

Исходные данные

Город	t_n °C	$t_{вн}$ °C	$\alpha_{вн}$ Вт/(м ² ·К)	α_n Вт/(м ² ·К)
Сочи	-5	22	8,7	23
Воронеж	-24	22	8,7	23
Архангельск	-34	22	8,7	23

Таблица 3.7

Параметры наружного ограждения

Название	λ	δ	C_p	ρ
	Вт/(м·К)	м	кДж/(кг·К)	кг/м ³
1	2	3	4	5
Двойной стеклопакет	0,8	0,03	0,84	2500
Воздушная прослойка	0,026	0,01	1,97	1,27
Железобетон	1,8	0,1	0,84	2500
Пенополистерол	0,025	0,1	1,46	30

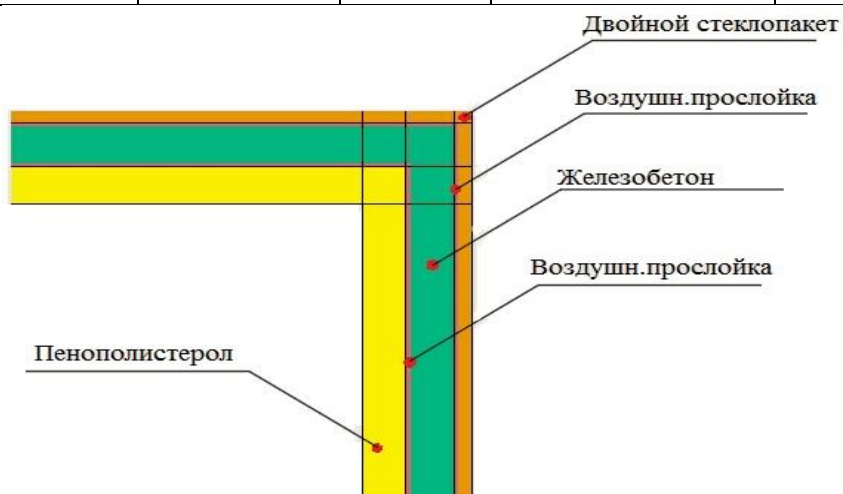


Рисунок 3.13. Слои наружного ограждения

На основании проведенных расчетов в программе Tempreg (рисунок 3.14), был сделан анализ пригодности использования разработанного наружного ограждения, которое состоит из пяти последовательно соединенных слоев (двойной стеклопакет, воздушная вентилируемая прослойка, железобетон, воздушная вентилируемая прослойка, пенополистирол).

Исследования было решено проводить на примере 3D модели угловой комнаты с перекрытием, в качестве случая наиболее подверженного частому промерзанию наружного ограждения.

Из проведенных расчетов по математической модели распределения температур было выяснено, что данная конструкция отвечает нормативным требованиям только в климатических зонах городов Сочи и Воронежа. На стыках конструкции температура имеет значение, которое находится в пределах допустимых норм, что не вызывает промерзания и появления грибковых образований, а следовательно, и разрушения ограждения.

Совершенно противоположный режим появляется при моделировании для условий города Архангельска в рамках исследования разработанной конструкции. Температура на стыках ограждения не соответствует нормам, вызывает промерзание, способствует появлению грибковых образований в зоне промерзания с последующим разрушением конструкции. Для достижения необходимого результата следует увеличить толщину теплоизоляционного материала.

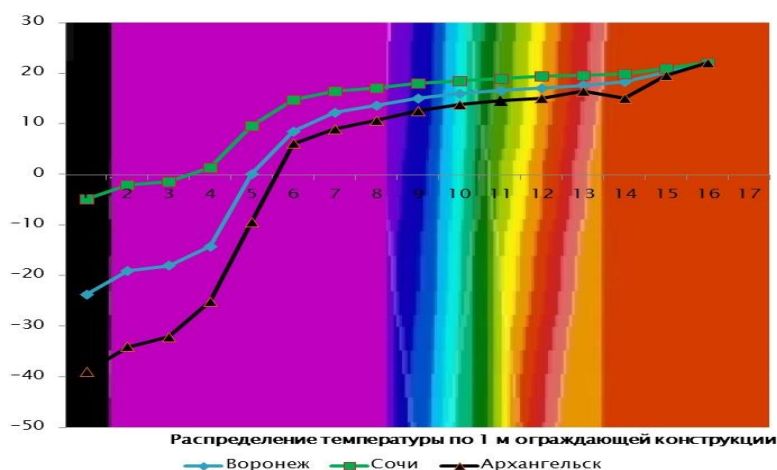


Рисунок 3.14. Стык расчетной наружной конструкции, длиной 1м

Представленные графики отражают распределение полей температур с оптимальной погрешностью.

Выводы по 3 главе

1. Проведённые экспериментальные исследования доказали неоспоримое преимущество с точки зрения повышения энергоэффективности зданий применения интегрированных в фасады солнечных панелей.

2. Полученные и обработанные эмпирические данные для холодного периода года подтвердили адекватность математической модели посредством сходимости результатов с достаточной точностью.

3. Примененная методика испытаний подтвердила заявленные теплозащитные и теплоаккумулирующие характеристики испытуемой энергоактивной стеновой панели в реальных эксплуатационных условиях.

4. На основе математического моделирования и полученных результатов экспериментальных исследований разработана прикладная программа для ЭВМ, позволяющая рассчитывать тепловые потоки в многослойной конструкции наружного ограждения при квазистационарном режиме изменения параметров наружной среды.

Глава 4. Оценка экономической эффективности внедрения технологии утилизации солнечного излучения энергоактивными наружными ограждениями

4.1. Обоснование необходимости оценки экономической эффективности внедрения новой технологии утилизации солнечной энергии

На современном этапе научно-технического развития и возникновения вопроса об экономии энергоресурсов в целях повышения экономической эффективности современных зданий и сооружений возникает задача разработки новых строительных материалов, технологий и внедрения их в строительный процесс.

В данной работе рассматривается частный пример обоснования применения новой технологии ограждающей конструкции, которая является альтернативой вентфасадам, получившим в последнее время широкое распространение, но являющихся недостаточно энергоэффективными.

Схема монтажа новой конструкции показана на рисунке 4.1, а традиционной конструкции на рисунке 4.2

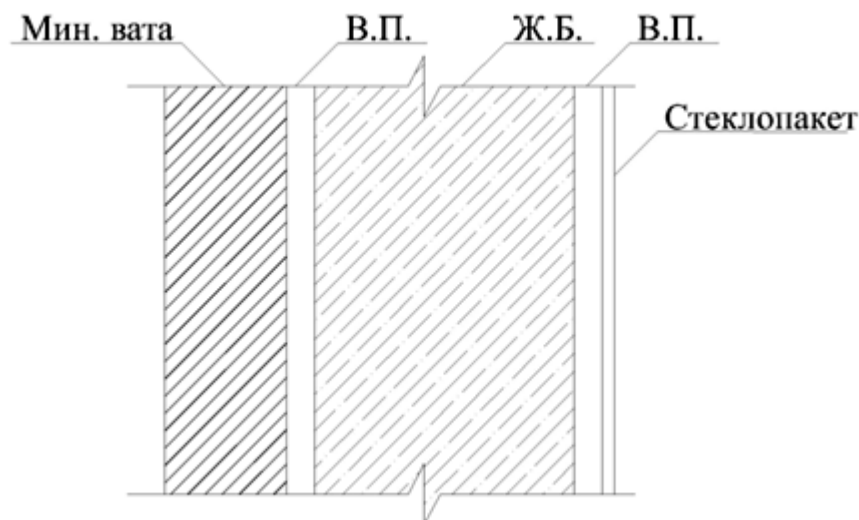


Рисунок 4.1. Схема возведения новой конструкции

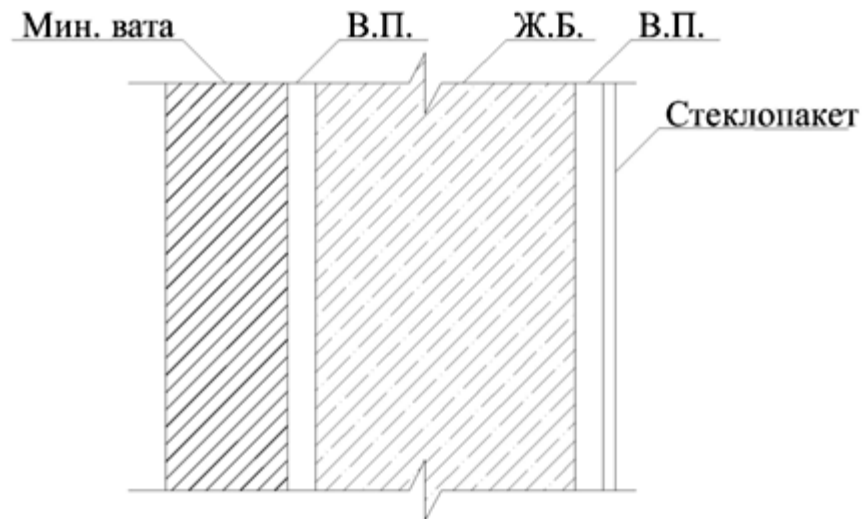


Рисунок 4.2. Схема возведения традиционной конструкции

Как видно из представленных рисунков сущность технологии заключается в замене уже ставшей традиционной конструкции вентиляционного фасада на фасад из пластиковых стеклопакетов, которые могут быть выполнены необходимого размера и конфигурации.

Сущность оценки экономической эффективности заключается в следующем:

1. Сравнение стоимости возведения на основе применения существующих сметных нормативов;
2. Сравнение стоимости технического содержания и эксплуатационных затрат (ремонта конструкций) на основе применения существующих сметных нормативов;
3. Оценка стоимости сокращения затрат на отопления помещения за счет применения новой технологии – экономический эффект от повышения энергоэффективности.

Для сравнения будут использоваться варианты ограждающей конструкции, представленные в таблице 4.1.

Таблица 4.1

Варианты ограждающей конструкции

Вид применяемого материала	Традиционный вариант	Предлагаемый вариант
Кирпичная стена(внешняя, несущая конструкция)		
Кирпич	Толщина конструкции	
	0,54 м	0,38 м
Утеплитель (минеральная вата)	Толщина конструкции	
	0,1 м	0,1 м
Внешняя ограждающая конструкция	вентфасад	Двойной стеклопакет
Монолитная железобетонная стена(внешняя, несущая конструкция)		
Монолитный железобетон	Толщина конструкции	
	0,5 м	0,3 м
Утеплитель (минеральная вата)	Толщина конструкции	
	0,1 м	0,1 м
Внешняя ограждающая конструкция	вентфасад	Двойной стеклопакет

Как видно из представленной таблицы, на стадии возведения экономия происходит за счет сокращения толщины несущей конструкции без снижения ограждающей и теплозащитной способности.

Рассмотрим расчет экономической эффективности более подробно.

4.2. Обоснование применения современной сметно-нормативной базы при определении стоимости строительно-монтажных и ремонтно-строительных работ в целях определения экономической эффективности внедрения новой технологии

Существует несколько подходов к определению стоимости выполнения строительно-монтажных работ. В данной работе применен метод определения затрат на основе сметных нормативов на выполнения работ.

Под *сметными нормативами* понимается комплекс сметных расценок и цен, которые вместе с определенными правилами и положениями, содержащими в себе необходимые требования, используются для определения сметной стоимости строительства [95].

Схема сметного нормирования представлена на рисунке 4.3

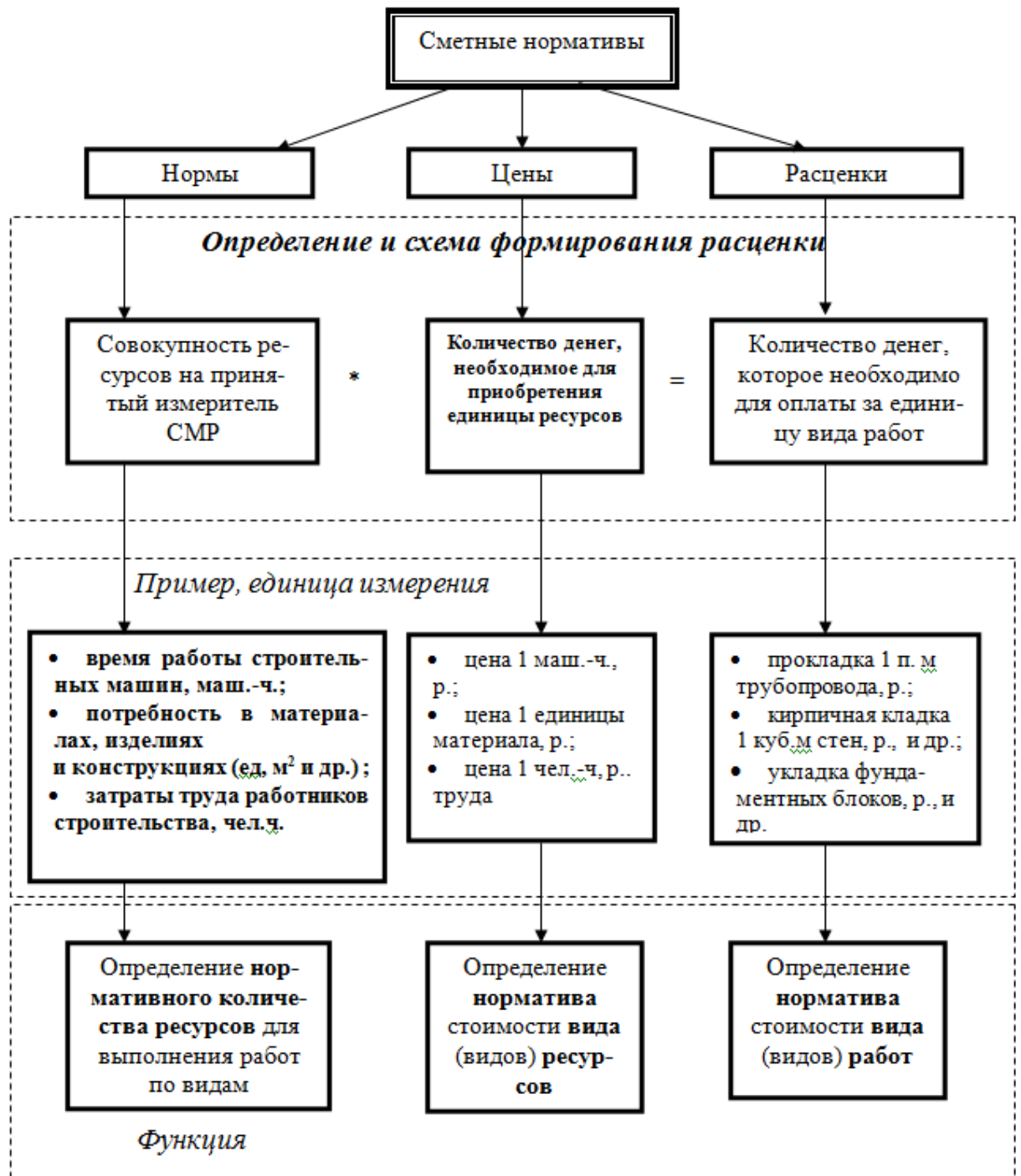


Рисунок 4.3. Схема системы сметного нормирования

Сметная норма представляет собой совокупность ресурсов, необходимых, но достаточных для выполнения определенного вида работ на принятый объем (измеритель) строительных, монтажных или других работ [95].

Под **ресурсами** подразумевается [96]:

- 1) затраты труда работников строительства,
- 2) затраты времени эксплуатации строительных машин и механизмов,
- 3) потребности в материалах, изделиях и конструкциях и т.п.

Сметные нормы являются основой для формирования сметных расценок, а также используются при формировании ресурсной ведомости и составлении сметных расчетов ресурсным методом.

Сметными нормами предусмотрено выполнение работ в нормальных или стандартных, т.е. не осложненных внешними факторами условиях. При определении стоимости работ с учетом внешних усложняющих факторов и сметных нормативов могут быть использованы повышающие коэффициенты.

Сметной ценой называется количество денежных единиц (ден. ед.), необходимое для приобретения единицы ресурса [96].

Под **ценой затрат труда работников строительства** понимается тарифная ставка рабочего соответствующего разряда, т.е. разряда необходимого для выполнения данного вида работ. Единицей изменения является денежная единица за 1 человеко-час (ден. ед за 1 чел.-ч) [96].

Под **ценой затрат времени эксплуатации строительных машин и механизмов** понимается стоимость 1 машино-часа эксплуатации соответствующего вида используемых (необходимых) машин и механизмов [93]. Единицей изменения является денежная единица за 1 машино-час (ден. ед. за 1 маш.-ч).

Сметная цена на используемые материалы складывается из следующих составляющих [97]:

1. Отпускные цены поставщиков материальных ресурсов.
2. Стоимость тары, упаковки и реквизита.
3. Стоимость транспортировки автомобильным, железнодорожным, речным (морским) и другими видами транспорта с учетом стоимости погрузо-разгрузочных работ.

4. Стоимость услуг снабженческих организаций (включая внешнеэкономические по таможенным пошлинам и сборам), услуг товарных бирж (включая брокерские услуги).

5. Заготовительно-складские расходы, включая затраты на комплектацию материалов.

Функция цен состоит в возможности приведения ресурсов в сопоставимый вид в денежном выражении. Под *расценкой* понимается сумма ресурсов в денежном выражении, необходимых для выполнения единицы вида работ [98].

Произведение количества ресурса в натуральных единицах измерения на цену единицы ресурса представляет собой *количество ресурса в денежном выражении* [98].

Функция расценок состоит в определении норматива стоимости единицы вида (видов) работ.

На рисунке 4.4. представлена схема формирования расценки.

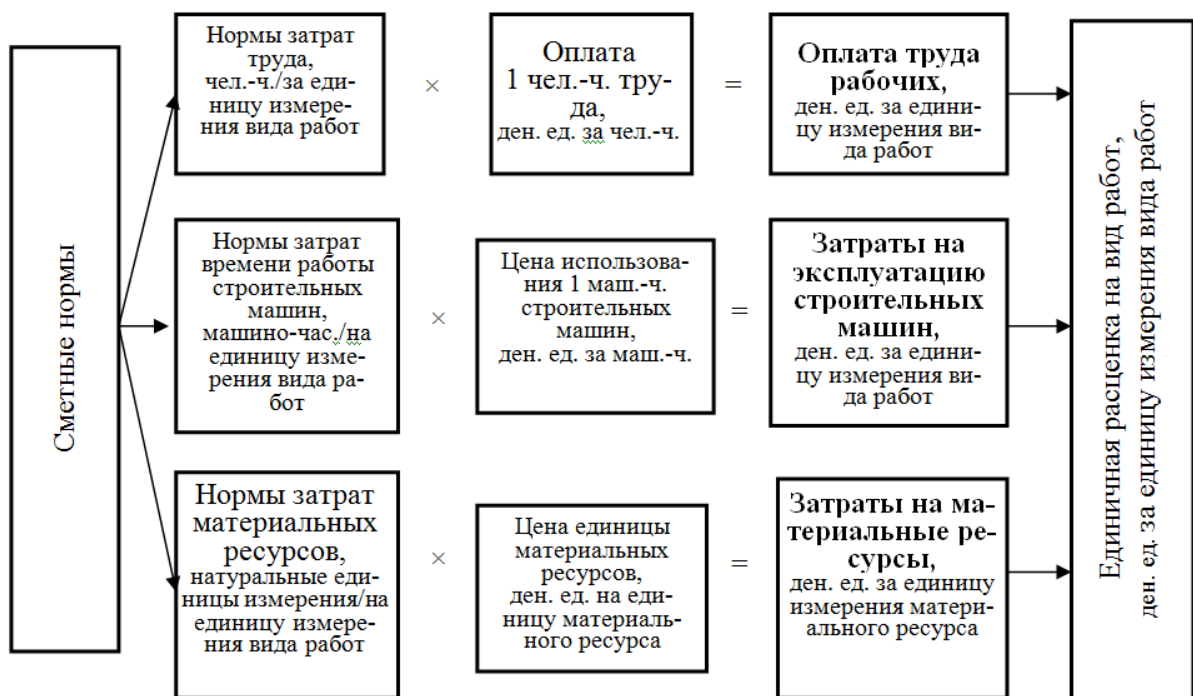


Рисунок. 4.4. Схема формирования расценки

В нашем случае отпадает необходимость разработки сметных нормативов, так как на выполняемые работы существуют территориальные и федеральные сметные нормативы.

В работе будет произведен расчет локальной сметы на 100 м² внешней поверхности конструкции на основе федеральных сметных нормативов, так как эти нормативы действуют на всей территории Российской Федерации и к условиям определенной территории, а также к современным ценам приводятся с помощью индексации, т.е. применения базисно-индексного метода определения сметной стоимости.

Сущность базисно-индексного метода состоит в следующем:

а) определение стоимости строительства основано на стоимости, определенной в базисном уровне цен (сметная стоимость в базисных ценах), т.е. по состоянию цен на 01.01.2000 г., применяемых в нормативной базе 2001 г.

б) пересчет в текущий, а в случае необходимости прогнозный уровень цен путем перемножения на индексы.

При выборе применяемого индекса основываются на следующем:

1. Предполагаемый или реальный календарный период выполнения работ.
2. Вид строительства (новой строительство, реконструкция, ремонт и т.д.).

Индексы разрабатываются и утверждаются Министерством строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации, а также различными региональными центрами по ценообразованию и сметному нормированию в области строительства.

Исходными данными для составления локальных смет базисно-индексным методом являются:

- объемы работ в соответствии с данными проекта,
- действующие сметные нормативы 2001 г. (сборники единичных расценок: ФЕР-2001 или ТЕР-2001, и цен на неучтенные ресурсы),
- индексы пересчета в текущий уровень цен; укрупненные нормативы накладных расходов и сметной прибыли.

Сметная стоимость строительно-монтажных работ, определяемая по локальным сметам, состоит из суммы трех статей (рисунок 4.5):



Рисунок 4.5. Схема состава сметной стоимости строительно-монтажных работ по статьям и элементам

1. Прямые затраты, которые учитывают стоимость материальных, трудовых и технических ресурсов, необходимых для выполнения работ непосредственно на месте строительства.

2. Накладные расходы, которые учитывают затраты строительно-монтажных организаций, связанные с созданием общих условий производства, его обслуживанием, организацией и управлением.

3. Сметная прибыль, которая по сути своей является нормативной прибылью предприятия и включает нормативную сумму средств - плановых накоплений, необходимых для покрытия отдельных (общих) расходов строительно-монтажных организаций на развитие производства, социальной сферы и материальное стимулирование.

4.3. Сравнение стоимости возведения конструкции на основе применения существующих сметных нормативов

Как уже было отмечено в пункте 4.2. для определения стоимости строительно-монтажных работ будет использована существующая сменно-нормативная база, разработанная и утвержденная Министерством строительства и жилищно-коммунального хозяйства.

В таблицах П1 и П2 приложения Е сравнивается стоимость возведения несущих конструкций из кирпича и ограждающих конструкций на основе вариантов, приведенных в таблице 4.1.

В таблицах приложения П3 и П4 Е сравнивается стоимость возведения несущих конструкций из монолитного железобетона и ограждающих конструкций на основе вариантов, приведенных в таблице 4.1.

Итоги расчетов сведены в таблицу 4.2.

Таблица 4.2

Сравнение вариантов возведения несущих конструкций устройством
дополнительной ограждающей конструкции (100 м² площади фасада), руб.¹

Наименование работ	Стоимость работ в базисном уровне цен	индекс пересчета в текущий уровень цен	Стоимость работ в текущем уровне цен
1. Возведение кирпичной стены толщиной 0,54 м и с установкой вентфасада из керамогранита	86128		680114
1.1 стоимость возведения несущей конструкции	55239	8,04	444122
1.2 стоимость ограждающей конструкции	30889	7,64	235992
2. Возведение кирпичной стены толщиной 0,38 м и с установкой фасада из стеклопакетов	159962		1237656
2.1 стоимость возведения несущей конструкции	38866	8,04	312483
2.2 стоимость ограждающей конструкции	121096	7,64	925173

¹ Стоимость работ приведена без учета налога на добавленную стоимость 18%

Окончание таблицы 4.2

Наименование работ	Стоимость работ в базисном уровне цен	индекс пересчета в текущий уровень цен	Стоимость работ в текущем уровне цен
3 Возведение монолитной железобетонной стены толщиной 0,5 м и с установкой вентфасадов	117397		880477
3.1 стоимость возведения несущей конструкции	86508	7,45	644485
3.2 стоимость ограждающей конструкции	30889	7,64	235992
4 Возведение монолитной железобетонной стены толщиной 0,3 м и с установкой фасада из стеклопакета	177155		1342813
4.1 стоимость возведения несущей конструкции	56059	7,45	417640
4.2 стоимость ограждающей конструкции	121096	7,64	925173

Из расчета видно, что в базисном уровне цен стоимость возведения монолитной конструкции обходится дороже, чем кирпичной, но в текущем уровне цен стоимость возведения конструкций практически одинакова. Это связано с тем, что индекс пересчета в текущий уровень цен² для монолитных железобетонных конструкций для базы ФЕР³ составляет 7,45⁴, а для кирпичных конструкции – 8,04, стоимость монтажа ограждающих конструкций – 7,64. Такая разница в индексах вызвана тем, что удорожание материалов, используемых при возведении кирпичных конструкций, выше чем для железобетонных.

² Используется индекс для СМР для Московской области, так как расчет произведен на основе сметно-нормативной базы ФЕР, которая разрабатывается для условий производства работ в Московской области. К конкретному региону текущая стоимость может быть скорректирована с помощью соответствующих этому региону индексов для СМР для ФЭР

³ Федеральная единичная расценка

⁴ Индексы изменения сметной стоимости строительно-монтажных работ по видам строительства, определяемых с применением федеральных и территориальных единичных расценок на 2 квартал 2017 года [без НДС] <http://www.e-smeta.ru/index/1013-index-minstroy-smr-fer-ter-2kv2017.html>

Можно сделать вывод о том, что стоимость возведения новой конструкции дороже традиционной в среднем в 1,52-1,82 раза. Следовательно, конструкция будет эффективной только в том случае, если эксплуатационные затраты по ней будут значительно ниже, чем при эксплуатации традиционной конструкции.

В процессе исследования было выяснено, что при монтаже системы отопления с применением остекления фасадов по сравнению с вентфасадами из керамогранита, сокращается в среднем на 20 % количество устанавливаемых отопительных приборов.

На основе укрупненных сметных нормативов было выявлено, что на 100 м² наружных стен устанавливается в среднем 9,18 кВт мощности приборов отопления. При монтаже фасадов из стеклопакетов мощность приборов может быть снижена до 7,34 кВт, т.е. на 20 %.

В таблице 4.3 приведены затраты на монтаж системы отопления в базисном и текущем уровне цен для традиционной и предлагаемой технологии.

Таблица 4.3

Капитальные вложения в монтаж системы отопления

(на 100 м² наружных стен)⁵

Наименование работ	Стоимость работ в базисном уровне цен	Индекс пересчета в текущий уровень цен	Стоимость работ в текущем уровне цен
1. При монтаже вентфасада из керамогранита с утеплением	6281,59	7,64	47991
2. При монтаже фасада из стеклопакета с внутренним утеплением	5025,27	7,64	38393

Проведем расчет сравнения затрат по возведению несущей конструкции, монтажу ограждающей конструкции и установке приборов отопления (таблица 4.4)

⁵ Определено на основе ФЕР18-03-001-02 Установка радиаторов: стальных (монтаж 1 кВт мощности отопительных приборов с учетом накладных расходов и сметной прибыли составляет 684,27 рубля в базисном уровне цен)

Таблица 4.4.

Сравнения затрат по возведению несущей конструкции, монтажу ограждающей конструкции и установке приборов отопления

Наименование конструкции	Традиционная конструкция	Предлагаемый вариант	Экономия /Перерасход
1. При кирпичном домостроении	728105	1237656	-509551
1.1 Стоимость возведения несущей конструкции	444122	312483	131639
1.2 Стоимость ограждающей конструкции	235992	925173	-689181
1.3. Установка приборов отопления	47991	0	47991
2 При монолитно-железобетонном домостроении	928468	1342813	-414345
2.1 Стоимость возведения несущей конструкции	644485	417640	226845
2.2 Стоимость ограждающей конструкции	235992	925173	-689181
2.3 Установка приборов отопления	47991	0	47991

Как видно из расчета, предлагаемый вариант в процессе монтажа значительно дороже. Следовательно, обоснование эффективности его внедрения можно получить только при определении затрат по его эксплуатации.

4.4. Сравнение стоимости технического содержания и эксплуатационных затрат (ремонта конструкций) на основе применения существующих сметных нормативов

На рисунках 4.1 и 4.2 представлены схемы возведения традиционной и предлагаемой к применению ограждающей конструкции. Из представленных рисунков видно, что в традиционном варианте утепляющий слой идет снаружи здания, следовательно, подвергается климатическим и погодным нагрузкам, а в предлагаемом варианте он находится внутри здания, следовательно, увеличивается срок его службы.

Следует отметить, что исследования о сроках службы вариантов облицовки здания показали:

1. В среднем срок службы венфасадов составляет 15-30 лет, затем необходима замена утепляющего слоя.

2. Срок службы предлагаемой конструкции из стеклопакетов – 25-50 лет.

Через 20 лет необходимо провести замену вентфасада из керамогранита на новый, следовательно, потребуются капитальные вложения (см. таблицу П5 приложения Е) в размере 3136 рублей в базисном уровне и 253158 в текущем уровне цен с учетом индекса пересчета 7,64 (100 м² ограждающих конструкций).

Так как срок службы системы отопления составляет в среднем 20-25 лет, то в течение рассматриваемого срока службы конструкции необходимо выполнить ремонт системы отопления.

Расчет ремонта системы отопления произведен с учетом демонтажа отопительного прибора⁶ и последующего монтажа нового.

В таблице 4.5 представлены данные по сравнению затрат на ремонт ограждающей конструкции и приборов отопления, который необходимо выполнить через 20 лет.

Таблица 4.5

Сравнению затрат на ремонт ограждающей конструкции и приборов отопления в текущем уровне цен на 100 м² ограждающей конструкции

Показатели	Традиционная конструкция	Предлагаемый вариант	Экономия /Перерасход
1. Всего	279045	20710	258335
1.1. Ремонт ограждающей конструкции	253158	0	253158
1.2. Замена приборов отопления	25887	20710	5177

Как видно из расчета, в процессе технической эксплуатации наблюдается значительный экономический эффект от применения новой технологии, который позволяет сократить затрат на ремонт ограждающей конструкции и системы отопления.

⁶ Определено на основе ФЕРр65-19-1 Демонтаж: радиаторов весом до 80 кг 17,79 рубля в базисном уровне цен демонтаж 1 отопительного прибора с учетом накладных расходов и сметной прибыли

4.5. Оценка стоимости сокращения затрат на отопление помещения за счет утилизации солнечного излучения – экономический эффект от повышения энергоэффективности

По данным Роскомстата Воронежской области на 2 полугодие 2017 года установлена стоимость 1 кВт часа для нужд отопления в размере 2044,76 рублей. Следовательно, стоимость 1 кВт составляет 0,2 рубля⁷.

На основе расчетов, приведенных во 2 и 3 главах диссертационной работы, были выявлено сокращение теплопотерь на 100 м² наружных стен в течение отопительного сезона, т.е. с октября по апрель.

В таблице 4.6. приведен расчет экономии платы за отопление в течение всего отопительного сезона за счет общего снижения теплопотерь.

Таблица 4.6

Расчет экономии платы за отопление

Месяц	Сокращение теплопотерь в кВтч/100 м ² наружных стен	Стоимость 1 кВтч, руб	Экономия в месяц, руб
октябрь	60,72	0,2	9 035
ноябрь	51,7	0,2	7 445
декабрь	43,56	0,2	6 482
январь	44	0,2	6 547
февраль	50,6	0,2	6 801
март	65,34	0,2	9 723
апрель	53,9	0,2	7 762
Итого	369,82		53 794

Из расчетов видно, что в среднем за отопительный сезон при внедрении новой технологии устройства ограждающей конструкции экономится порядка 54000 рублей. При росте тарифа на отопления эта экономия будет еще более существенной.

⁷ 1 кВт = 0,000086 Гкал 1 кал = 1,163 кВт

Исходя из полученных данных, возможно определить экономию по другим регионам Российской Федерации при аналогичном строительстве. Для этого примем за базовый пример г. Воронеж – коэффициент для данного региона строительства будем считать равным 1. Для получения коэффициента пересчета необходимо учитывать продолжительность отопительного периода, стоимость возведения ограждающей конструкции, количество поступающей солнечной радиации, требуемые теплотехнические характеристики. Величина экономии тепловой энергии, а также эквивалент в рублях приведены в таблице 4.7.

Таблица 4.7

Экономия тепловой энергии в различных регионах

Регион	Коэффициент изменения теплопотерь к г. Воронеж	Сокращение теплопотерь за отопительный год, кВтч/100 м ²	Экономия за отопительный период, руб.	Экономия за отопительный период, Гкал.
Воронеж	1	369,82	53794	26
Краснодар	0,59	218,99	31854,72	15
Сочи	0,29	105,83	15394,47	7,5
Архангельск	1,16	428,45	62322,29	30,5
Екатеринбург	1,39	513,57	74704,27	36
Новосибирск	1,21	447,87	65146,77	32
Владивосток	1,12	413,09	60088,18	29

Исходя из полученных данных, возможно определить интервал коэффициентов для определения экономии при использовании энергосберегающей технологии в конкретном регионе строительства. Значения коэффициентов приведены в таблице 4.8.

Таблица 4.8

Значения коэффициентов

Федеральный округ	Значения коэффициентов
Центральный	0,95-1,05
Южный	0,55-0,65
Северо-Кавказский	0,25-0,4
Северо-Западный	1,1-1,2
Приволжский	1,05-1,15
Уральский	1,3-1,5
Сибирский	1,15-1,3
Дальневосточный	1,05-1,2

4.6. Расчет экономической эффективности внедрения стеновых солнечных панелей

Из представленных выше расчетов видно, что на 100 м² наружной площади несущей стены на стадии нового строительства происходит экономия ресурсов при возведении несущей конструкции с учетом монтажа ограждающей конструкции по новой технологии:

- при монолитном строительстве 227 тыс. руб.;
- при кирпичном строительстве 132 тыс. руб.

Происходит экономия ресурсов при установке приборов отопления на 48 тыс. руб. на 100 м² наружной площади несущей стены.

Происходит перерасход ресурсов на монтаж ограждающей конструкции из стеклопакетов по сравнению с установкой вентиляционных фасадов – 653 тыс. руб.

На стадии технического содержания и эксплуатационных затрат (ремонта конструкций) происходит экономия затрат при ремонте системы отопления и замене фасада в размере 258 тыс. руб. (ремонт осуществляется через 20 лет после начала эксплуатации).

Происходит экономия затрат на оплату отопления в течении всего отопительного сезона за счет сокращения теплопотерь в размере 54 тыс. руб.

Для оценки окупаемости предлагаемой технологии произведен расчет сроков окупаемости:

1) при кирпичном строительстве $509551/53794 = 9$ лет 6 месяцев (рисунок 4.6),

2) при монолитном строительстве $414345/53794 = 7$ лет 9 месяцев (рисунок 4.7)

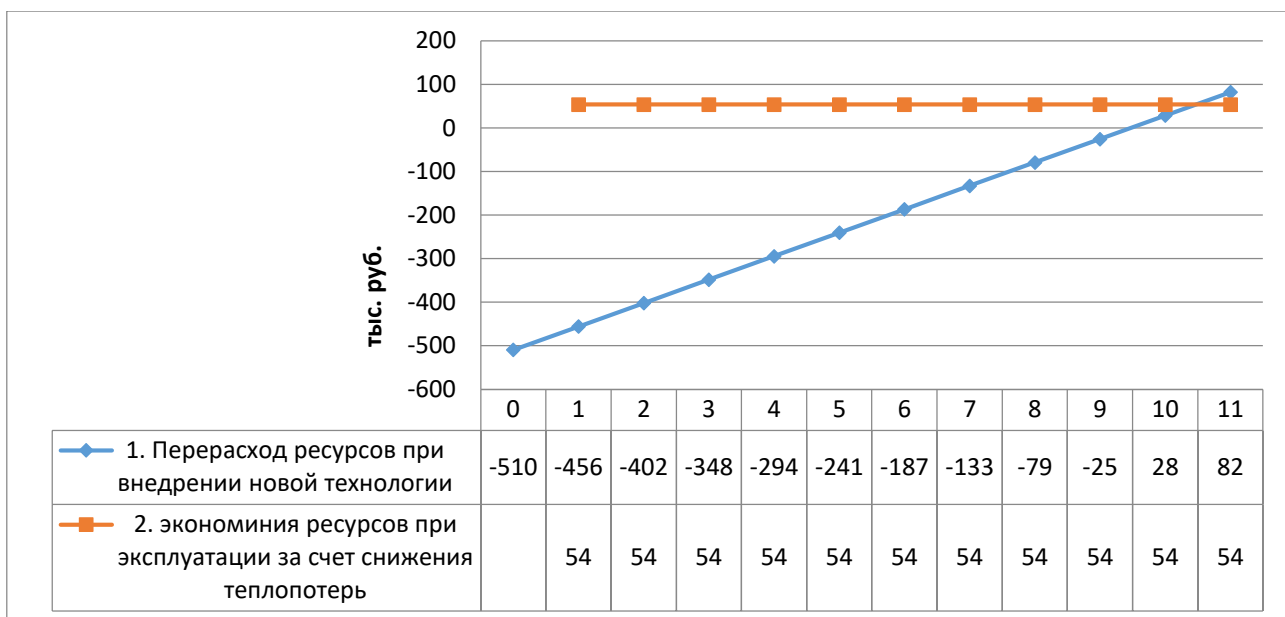


Рисунок 4.6. Срок окупаемости новой технологии при кирпичном строительстве

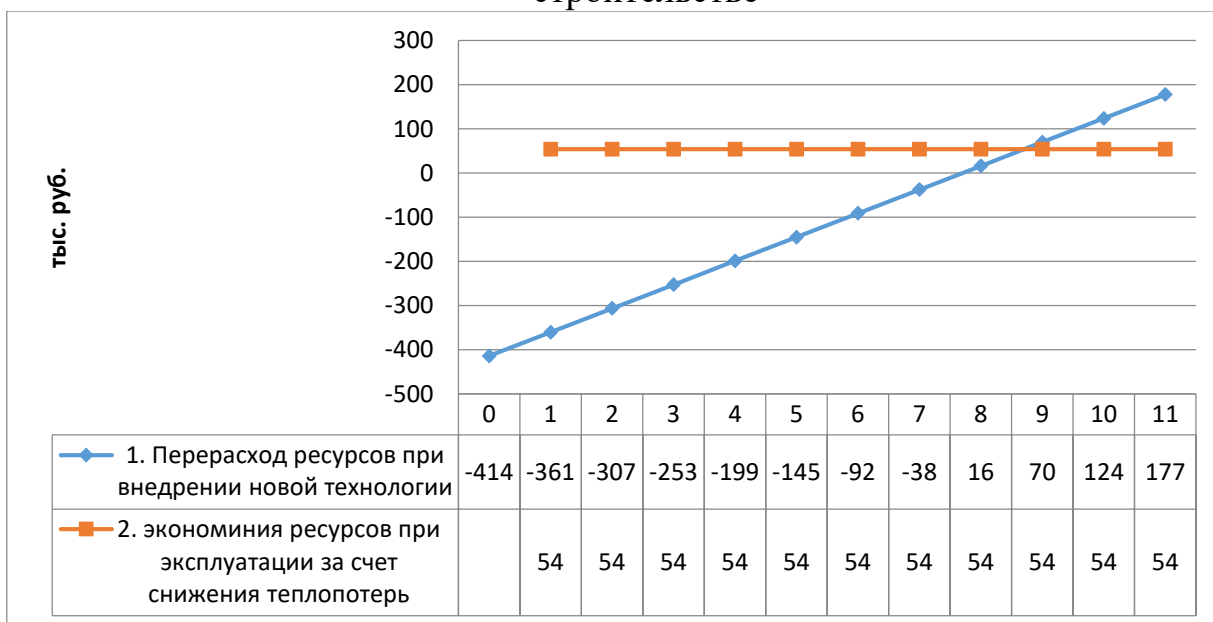


Рисунок 4.7. Срок окупаемости новой технологии при монолитном строительстве

Выполнено технико-экономическое обоснование эффективности энергоактивных ограждающих конструкций, которое показало перспективность их внедрения для энергосберегающей эксплуатации зданий.

Заключение

1. На основе анализа ресурсов солнечного излучения, а также существующих способов и конструкций его пассивной утилизации установлено, что для климатических условий РФ использование энергоэффективных наружных ограждений позволяет повысить энергоэффективность зданий и сооружений.
2. Конструирование энергоэффективных наружных стен предполагает расположение несущего аккумулирующего слоя с внешней стороны под светопрозрачным ограждением и его защиту от перегрева в теплый период года посредством подвижных жалюзи или размещения на поглощающей поверхности развитой схемы трубопроводов для горячего водоснабжения. Последнее техническое решение позволяет отказаться в летний сезон от потребления традиционной тепловой энергии на горячее водоснабжение.
3. На основе выполненных теоретических исследований получены зависимости температурных режимов и тепловых потоков в энергоэффективных многослойных ограждениях, учитывающие суточные изменения солнечной радиации.
4. Предложен алгоритм и программа расчета, позволяющая численно рассчитать значения потоков, поступающих в помещение от энергоэффективной стеновой панели в зависимости от интенсивности солнечного излучения, температуры наружного воздуха и времени суток.
5. Результаты математического моделирования выявили рекомендуемую к проектированию толщину поглощающего и аккумулирующего слоя, которая в зависимости от широты местности и климатической зоны находится в интервале от 80 до 130 мм.
6. Экспериментальные исследования тепловых режимов интегрированной в фасад энергоэффективной панели показали, что при солнечной погоде и низких отрицательных температурах наружного воздуха фиксируется постоянное поступление тепла в помещение, количественно изменяющееся в течение суток.

7. Инерционность аккумулирующего слоя энергоэффективных наружных ограждений приводит к достижению максимальных поступлений в помещение утилизированной теплоты в период с 17 до 19 часов, а минимальных с 5 до 7 часов.
8. Применение энергоэффективных наружных ограждений в климатических условиях РФ позволяет сократить потребление тепловой энергии в интервале от 7 Гкал до 36 Гкал на 100 м² поверхности энергоэффективного ограждения в зависимости от региона строительства.
9. Для спроектированного и построенного здания в г. Воронеж применение энергоэффективных наружных ограждений, способных аккумулировать солнечную энергию, позволило достичь экономии в размере 653 тыс. рублей в ценах 2018 года на обогрев здания в течение отопительного периода.

Список литературы

1. Об основных направлениях государственной политики в сфере повышения энергетической эффективности электроэнергетики на основе использования возобновляемых источников энергии на период до 2020 года: распоряжение Правительства Российской Федерации от 8 января 2009 г. № 1-р (ред. от 28 мая 2013 г.) // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2009. – № 4. – Ст. 515.
2. Об утверждении Положения о формировании перечня проектов использования возобновляемых источников энергии и перечня проектов использования экологически чистых производственных технологий в топливно-энергетическом комплексе: приказ Минэнерго Российской Федерации от 30 июня 2010 г. № 299: (зарегистрировано в Минюсте Российской Федерации 16 августа 2010 № 18156) // Российская газета. – 2010. – № 187
3. Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности, и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации: закон Российской Федерации от 23 ноября 2009 г. № 261-ФЗ (ред. от 28 декабря 2013 г.) Собрание законодательства Российской Федерации. – 2009. – № 48. – Ст. 5711.
4. Маркус, Т.А. Здания, климат и энергия / Т. А. Маркус, Э. Н. Моррис; Пер. с англ. под ред. Н. В. Кобышевой, Е. Г. Малявиной. - Л.: Гидрометеиздат, 1985. - 543 с.: ил.; 22 см.
5. Бутузов В.А. Солнечное теплоснабжение: мировой опыт и перспективы российской гелиотехники // Альтернативная энергетика, 2013. №8. С. 42–48.
6. СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02–2003. Минрегион России. — М.: ООО «Аналитик», 2012. 95 с.
7. СП 23-101–2004. Проектирование тепловой защиты зданий. — М.: НИИСФ РААСН, 2004.

8. EN (ISO) 10456. Building materials and products. Hygrothermal properties. Tabulated design values and procedures for determining declared and design thermal values. Geneva: ISO copyright office, 2007.
9. EN (ISO) 13788 Hygrothermal performance of building components and building elements. Internal surface temperature to avoid critical humidity and interstitial condensation. Calculation methods. Geneva: ISO copyright office, 2012.
10. Системы обеспечения микроклимата зданий и сооружений: учебное пособие /Жерлыкина М.Н., Яременко С.А. Воронеж: Воронежский ГАСУ, 2013.
11. Соренсен Б. Преобразование, передача и аккумулирование энергии: [учебно-справочное руководство для студентов и преподавателей инженерно-физических и энергетических специальностей, инженеров-разработчиков] / Б. Соренсен; пер. с англ. под ред. А. Д. Калашникова. – Долгопрудный: Интеллект, 2011. – 295 с.
12. Франчук А.У. Таблицы теплотехнических показателей строительных материалов. М.: Госстрой СССР, НИИ строительной физики, 1969.
13. Фокин В.М., Ковылин А.В., Чернышов В.Н. Ф75 Энергоэффективные методы определения теплофизических свойств строительных материалов и изделий. – М.: Издательский дом «Спектр», 2011. – 156 с. – 400 экз. – ISBN 978-5-904270-90-2.
14. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий / Под ред. Ю.А. Табунщикова, В.Г. Гагарина. – 5-е изд., пересмотр. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2006. – 256 с.
15. Береговой А. М. Здания с энергосберегающими конструкциями: Дис. д-ра техн. наук: 05.23.01 Пенза, 2005 343 с. РГБ ОД, 71:06-5/34.
16. Фортов, В. Е. Энергетика в современном мире / В. Е. Фортов, О. С. Попель. – Долгопрудный: Интеллект, 2011. – 167 с.
17. Алхасов, А. Б. Возобновляемая энергетика: [монография] / А. Б. Алхасов; под ред. В. Е. Фортова. – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 255 с.

18. Schoof Mareike, Resch Bernd, Ludwig Dorothea. A GISbased concept for solar energetic examination of new building projects // GIS and Science. 2013. Vol. 26. №3. P. 97–103.
19. Быстрицкий, Г. Ф. Общая энергетика: учебное пособие / Г. Ф. Быстрицкий. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва: КНОРУС, 2010. – 293 с.
20. Гибилиско, С. Альтернативная энергетика: путеводитель / С. Гибилиско; [пер. с англ. А. В. Соловьева]. – Москва: Эксмо, 2010. – 365, [1] с.
21. Денк, С. О. Возобновляемые источники энергии. На берегу энергетического океана / С. О. Денк. – Пермь: Изд-во Пермского государственного технического университета, 2008. – 285, [1] с.
22. СП 131.13330.2012. Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01–99*. Минрегион России. — М.: ООО «Аналитик», 2012. 108 с.
23. Солнечная энергетика: учебное пособие / В. И. Виссарионов [и др.]; под ред. В. И. Виссарионова. – 2-е изд., стер. – Москва: Издательский дом МЭИ, 2011. – 276 с.
24. Сибикин, Ю. Д. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: учебное пособие / Ю. Д. Сибикин, М. Ю. Сибикин. – Москва: КНОРУС, 2010. – 227 с.
25. Алехин, В. А. Области применения солнечной энергетики / В. А. Алехин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2013. – № 12. – С. 3-8.
26. Малявина Е.Г. Расчет солнечной радиации в зимнее время / Е.Г. Малявина, А.Н. Борщев // Журнал АВОК. 2006 – № 7 – С. 28 - 36.
27. Баскаков А.П., Мунц В.А. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. — М.: ИД «Бастет», 2013. 368 с.
28. Бутузов В.А., Бутузов В.В. Использование солнечной энергии для производства тепловой энергии: Справочно-методическое издание. — М.: «Интехэнерго-Издат», «Теплоэнергетик», 2015. 304 с.

29. Земсков В.И. Возобновляемые источники энергии в АПК. — СПб.: Изд-во «Лань», 2014. 368 с.
30. Смирнова О.А., Ващинская И.В., Аветисян Ю.Э. Исследование теплофизических свойств абсорбентов для надувных воздушных солнечных коллекторов // Инновационная наука, 2015. №8. Ч. 2. С. 76–78.
31. Tian Y., Zhao C.Y. A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications // Applied Energy. 2013. No. 104. P. 538–553
32. D'Antoni M., Saro O. Energy potential of a Massive Solar-Thermal Collector design in European climates // Solar Energy. 2013. No. 93. P. 195–208.
33. Student solar heizen // Sonne Wind und Warme. 2014. Vol. 38. No. 3. P. 24.
34. Tan Alex Yong Kwang, Wong Nyuk Hien. Influences of ambient air speed and internal heat load on the performance of solar chimney in the tropics // Solar Energy. 2014. No. 102. P. 116–125.
35. Tyagi R.K., Ranjan Ravi, Kishore Kunal. Performance studies on flat plate solar air heater subjected to various flow patterns // Heliotechnic. 2014. No. 2. P. 38–43.
36. Bahrehmand D., Ameri M. Energy and exergy analysis of different solar air collector systems with natural convection // Renewable Energy. 2015. No. 74. P. 357–368.
37. Kong Weiqiang, Perers Bengt, Fan Jianhua, Furbo Simon et al. A new Laplace transformation method for dynamic testing of solar collectors // Renewable Energy. 2015. No. 75. P. 448–458.
38. Петров В.М. Оценка поступления солнечной энергии на поверхности активных фасадно-интегрированных солнечных систем энергоснабжения // Альтернативная энергетика, 2014. №11. P. 85–91.
39. Турулов А.В. Гелиоактивные стены зданий. — М.: Изд-во «АСВ», 2011. 168 с.

40. Yannick B., Biwole P.H., Achard P., Hebert S. Et al. Full scale experimentation on a new translucent passive solar wall combining silica aerogels and phase change materials // *Solar Energy*. 2015. No. 115. P. 733–742.
41. Щукина Т.В., Чудинов Д.М. Исследование эффективности энергоактивных ограждений для пассивного солнечного отопления // *Промышленная энергетика*, 2007. №8. С. 52–54.
42. Даффи Дж., Бекман У. Основы солнечной теплоэнергетики. — Долгопр.: ИД «Интеллект», 2013. 888 с.
43. Quesada G., Rousse D., Dutil Y., Balache M., Hallé S. A comprehensive review of solar facades. Transparent and translucent solar facades. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16 (5), 2643-2651 (2012).
44. Navarro L., Grasia A. De, Niall D., Castell A., Browne M., McCormack S.J., Griffiths P., Gabeza L.F. Thermal energy storage in building integrated thermal systems: A review. Part.2. Integration as passive system. *Renewable Energy*, **30**, 1-23 (2015).
45. Zhou Ao, Wong K.-W., Lau D. Thermal insulating concrete wall panel design for sustainable built environment. Hundawi Publishing Corporation. *The Scientific World Journal*, ID 279592 (12) (2014).
46. Skujans J., Vulans A., Iljins U., Aboltins A. Measurement of heat transfer of multy-layered wall construction with foam gypsum. *Appl. Thermal Eng.*, **27**, 1219-1224 (2007).
47. Turchin N., Timar I., Kolodii Yu. A. Nonstationary axisymmetric temperature field in a two-layer slab under mixed heating conditions. *J. of Eng. Phys. and Thermophysics*, 88 (5), 1135-1144 (2015).
48. Самарский А. А., Соболев И. М., “Примеры численного расчета температурных волн”, *Ж. вычисл. матем. и матем. физ.*, 3:4 (1963), 702–719; *U.S.S.R. Comput. Math. Math. Phys.*, 3:4 (1963), 945–970.
49. Мэтьюс Дж., Финк К.Д. Численные методы. Использование MATLAB. М.: Изд. Дом «Вильямс», 2001. – 720 с.

50. Takhar H.S., Chamkha A.J., Nath G. Effects of non-uniform wall temperature and mass transfer infinite section of an inclined plate on the MDH natural convection flow in a temperature stratified high-porosity medium. *Int. J. Therm. Sc.*, 42, 829-836 (2003).
51. Aksenov B., Karyakina S., Stepanov O., Shapoval A., Bodrov M. Mathematical modeling of temperature field of multilayer enclosure structures. *MATEC Web of Conference*, **73**, 02023 (2016).
52. Aliawdin P., Marcinovski J., Wilk P. Theoretical and experimental analysis of heat transfer in the layers of road pavement. *Civil and Environmental Engineering Reports*, 1, 7-18 (2005).
53. Nguyen C.H., Chandrashekhara K., Birman V. Multifunctional thermal barrier coating in aerospace sandwich panels. *Mechanics Research Communications*, **32**, 35043 (2012).
54. Кошляков Н.С., Глинер Э.Б., Смирнов М.М. Основные дифференциальные уравнения математической физики. М.: ГИФМЛ, 1962. – 767 с.
55. Деч Г. Руководство к практическому преобразованию Лапласа. М.: Наука, 1965. – 287 с.
56. Карслоу Г., Эгер Д. Теплопроводность твердых тел. М.: Наука, 1964. – 488 с.
57. J.W. Fu, A.H. Akbarzadeh, Z.T. Chen, L.F. Qian, D. Pasini. Non-Fourier heat conduction in sandwich panel with a cracked foam. *Int. J. Therm. Sciences*, 102, 263-273 (2016).
58. Ahmed A., Kalita K. Analytical and numerical study for MHD radiating flow over an infinite vertical surface bounded by porous medium in presence of chemical reaction. *J. Appl. Fluid Mechanics*, **6**(4), 597-607 (2013).
59. Kolisnichenko N., Volgusheva N., Boshkova I. Analytical study of the processes of thermal conductivity at high intensity heating. *Easten-European J. of Enterprise Technologies*, 83 (5/8), 26-31 (2016).

60. Laghenbuch A.H. Periodic heat flow in a stratified medium with application to permafrost problem. US Government Printing Office. Washington, 1959. – 38 p.
61. Nilsen S.B., Balling N. Transient heat flow in a stratified medium Tectonophysics, 121, 1-10 (1985).
62. Larkin B.K. Transient heat flow in three-dimensional sandwich panels. AIAA 8th Aerospace Meeting, NY, 1970. p. 426-442.
63. Pupeikis D., Stanlevičius V., Burlingis A. The effect of the Fourier number on calculation of an unsteady heat transfer of building walls. J. Civil Eng. & Menagement, 16(2), 298-305 (2010).
64. Морс Ф.М., Фешбах Г. Методы теоретической физики. М.: ИИЛ, 1960. Т.2. С. 544.
65. Аверин В.В. Общая схема решения краевой задачи нестационарной теплопроводности с внутренними источниками теплоты для многослойных конструкций. Вестн. Саратовского Гос. Ун-та. Сер. Физ.-мат. Науки. 19(2), 274-277 (2009).
66. Das A., Alagirusamy A., Kumar P. Study of heat transfer through multilayer closing assemblies: a theoretical prediction. AUTEX Research Journal, 11, 54-60 (2011).
67. Nikitin V., Lapko A. On modeling heat and moisture transfer in sandwich wall and slab structures. J. Civil Eng. & Management, 12(4), 337-343 (2008).
68. Богословский В.Н. Строительная теплофизика. М.: Высшая школа, 1982. – 415 с.
69. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. М.: МГУ, 1999. – 798 с.
70. Толстова Ю.И., Шумилов Р.Н. Основы строительной теплофизики. Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2014. – 104 с.
71. Христофоров А.В., Абросимова И.В. Интерференция температурных волн. Казань: Институт физики ПФУ, 2012. – 18 с.
72. Харкевич А.А. Спектры и анализ. М.: Изд-во ЛКИ, 2007. – 240 с.

73. Франк Ф., Мизес Р. Дифференциальные и интегральные уравнения математической физики. Л.: ОНТИ, 1937. – 998 с.
74. Теплотехнический справочник. Т. 2. Ред. В.И. Трембовля. М.: Энергия, 1976. – 896 с.
75. Shchukina T.V., Sheps R.A., Kuznetsova N.V. Passive solar heating: how to control heating regime. Int. J. of Environmental and Science Education. 11(18), 11361-11373 (2016).
76. ГОСТ 6651-2009. Термопреобразователи сопротивления. Общие технические требования и методы испытаний. М.: Стандартинформ, 2011, 30 С.
77. ГОСТ 25380-2014 ГОСТ 25380-2014 Здания и сооружения. Метод измерения плотности тепловых потоков, проходящих через ограждающие конструкции. М.: Стандартинформ, 2015, 11 С.
78. ГОСТ 26254-84 Здания и сооружения. Методы определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций. М.: Издательство стандартов, 1994. 27
79. ГОСТ 26602.1-99 Блоки оконные и дверные. Методы определения сопротивления теплопередаче (с Поправкой). М.: Госстрой России, ГУП ЦПП, 2000. 24 С.
80. ГОСТ 7076-99 Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме. М.: Госстрой России, ГУП ЦПП, 2000, 27 С.
81. ГОСТ 8711-93 Приборы аналоговые показывающие электроизмерительные прямого действия и вспомогательные части к ним. Часть 2. Особые требования к амперметрам и вольтметрам. М.: Стандартинформ, 2007, 16 С.
82. ГОСТ 9245-79 Потенциометры постоянного тока измерительные. Общие технические условия. М.: ИПК Издательство стандартов, 2002, 16 С.

83. ГОСТ 8.140-2009 Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Государственная поверочная схема для средств измерений теплопроводности твердых тел в диапазоне от 0,02 до 20 Вт/(м·К) при температуре от 90 до 1100 К. М.: Стандартиформ, 2010, 16 С.

84. Завадский Ю.В. Методика статистической обработки экспериментальных данных [Текст]: (Курс лекций) / М-во высш. и сред. спец. образования СССР. Моск. автомоб.-дор. ин-т фак. повышения квалификации преподавателей вузов. - Москва: [б. и.], 1973. - 98 с.: граф.; 25 см.

85. Реброва И.А. Планирование эксперимента: учебное пособие. – Омск: СибАДИ, 2010. – 105 с.

86. ГОСТ 24026-80 «Исследовательские испытания. Планирование эксперимента. Термины и определения. М.: Издательство стандартов, 1991, 14 С.

87. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов / Под ред. Э.К. Лецкого. - М.: Мир, 1977.

88. Серафинович Л.П. Планирование эксперимента: Учебное пособие. — Томск: Томский межвузовский центр дистанционного образования, 2006. — 128 с.

89. Коробко В.И., Коробко А.В. Контроль качества строительных конструкций. Виброакустические технологии. Учебное пособие. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2003. – 288 с.

90. Волосухин В.А., Тищенко А.И. Планирование научного эксперимента. – М.: РИОР, Инфра-М, 2014. – 176 с.

91. Зедгинидзе, И.Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем / И.Г. Зедгинидзе. - М.: [не указано], 1976. - 692 с.

92. Монтгомери, Д.К. Планирование эксперимента и анализ данных / Д.К. Монтгомери. - М.: 1980. - 857 с.

93. Беликова, Т.Н. Все об учете в строительстве / Т.Н. Беликова. - М.: СПб: Питер, 2006. - 304 с.
94. Кассандрова О.Н., Обработка результатов наблюдений / О.Н. Кассандрова, В.В. Лебедев. – М.: Наука, 1970. – 109 с.
95. Овсянников А.С., Воротынцева А.В., Казьмина Д.А. Ценообразование и сметное нормирование в строительстве: практикум. - Воронеж: Воронеж. гос. арх.-строит. ун-т, 2016. – 105с.
96. Гасилов В.В., Воротынцева А.В., Овсянников А.С. Сметное дело в строительстве: учебное пособие. - Воронеж: Воронеж. гос. арх.-строит. ун-т, 2016. – 193с.
97. Овсянников А.С., Воротынцева А.В., Болгов В.А. Особенности определения стоимости капитального ремонта зданий и сооружений промышленного и жилищно-гражданского назначения. - VIмеждународная научно-практическая конференция «Проблемы современных экономических, правовых и естественных наук в России» (21-23 апреля 2017 года)
98. Овсянников А.С., Воротынцева А.В., Болгов В.А. Estimated valuation of the cost of road construction with the use of composite cationic bituminous structures (Сметное нормирование стоимости дорожно-строительных работ с применением композитных катионоактивных битумных составов) - MATEC Web of ConferencesVolume 106 (2017) International Science Conference SPbWOSCE-2016 “SMART City” St. Petersburg, Russia, November 15-17, 2016 V. Murgul (Ed.) (скопys)

Решение линейной системы алгебраических уравнений

Стационарная задача, в которую включены средние температуры и средние потоки солнечной энергии решается линейной системы алгебраических уравнений относительно коэффициентов a_1, b_1, a_2, b_2

Преобразуем систему (2.11), сделав замены $\beta_1 = \lambda_1 b_1, \beta_2 = \lambda_2 b_2$:

$$\alpha_0 a_1 = \beta_1, \quad (\text{П.1})$$

$$\beta_1 = \beta_2 + j_0, \quad (\text{П.2})$$

$$a_1 + \beta_1 x_1 / \lambda_1 = a_2 + \beta_2 x_2 / \lambda_2, \quad (\text{П.3})$$

$$\alpha_{\text{ext}} (T_{\text{ext}} - a_2 - \beta_2 x_2 / \lambda_2) = \beta_2. \quad (\text{П.4})$$

Уравнение (П.3) позволяет переписать (П.4) как

$$\alpha_{\text{ext}} (T_{\text{ext}} - a_1 - \beta_1 x_1 / \lambda_1) = \beta_2. \quad (\text{П.5})$$

С учетом (П.2) имеем

$$\alpha_{\text{ext}} (T_{\text{ext}} - a_1 - \beta_1 x_1 / \lambda_1) = \beta_1 - j_0. \quad (\text{П.6})$$

Далее из (П.1) следует $a_1 = \beta_1 / \alpha_0$, и (П.6) преобразуется к виду

$$T_{\text{ext}} - \beta_1 / \alpha_0 - \beta_1 x_1 / \lambda_1 + j_0 / \alpha_{\text{ext}} = \beta_1 / \alpha_{\text{ext}}. \quad (\text{П.7})$$

Отсюда следует

$$T_{\text{ext}} + j_0 / \alpha_{\text{ext}} = \beta_1 (1 / \alpha_{\text{ext}} + 1 / \alpha_0 + x_1 / \lambda_1)$$

и

$$\beta_1 = \frac{T_{\text{ext}} + j_0 / \alpha_{\text{ext}}}{1 / \alpha_{\text{ext}} + 1 / \alpha_0 + x_1 / \lambda_1}, \quad (\text{П.8})$$

$$a_1 = \beta_1 / \alpha_0 = \frac{T_{\text{ext}} + j_0 / \alpha_{\text{ext}}}{\alpha_0 / \alpha_{\text{ext}} + \alpha_0 x_1 / \lambda_1 + 1}. \quad (\text{П.9})$$

Затем

$$\beta_2 = \beta_1 - j_0 = \frac{T_{\text{ext}} - j_0 (1 / \alpha_0 + x_1 / \lambda_1)}{1 / \alpha_{\text{ext}} + 1 / \alpha_0 + x_1 / \lambda_1}. \quad (\text{П.10})$$

$$a_2 = a_1 + \beta_1 x_1 / \lambda_1 - \beta_2 x_2 / \lambda_2. \quad (\text{П.11})$$

Формулы (П.8)-(П.11) завершают решение стационарной задачи.

Приложение Б

Расчет констант при переносе тепла в однородном слое

Решение задачи о переносе тепла в плоском однородном слое с гармоническим граничным условием ищется в виде суммы прямой и отраженной волн. Два граничных условия позволяют определить две искомые константы $A = A_0 e^{i\varphi_-}$, $A_0 = |A|$ и $B = B_0 e^{i\varphi_+}$, $B_0 = |B|$.

Подставляя (2.19) в граничные условия (2.20), получим два алгебраических уравнения

$$T(x, t) = A \exp(-\beta x - i\beta x) \exp(i\omega t) + B \exp(\beta x + i\beta x) \exp(i\omega t) = \\ = [A \exp(-\gamma x) + B \exp(\gamma x)] \exp(i\omega t). \quad (\text{П2.1})$$

Граничные условия

$$-\alpha(A + B) = -\lambda(-\gamma A + \gamma B), \\ -\alpha(\theta - A \exp(-\gamma l) - B \exp(\gamma l)) = \lambda(\gamma A \exp(-\gamma l) - \gamma B \exp(\gamma l)). \quad (\text{П2.2})$$

Здесь

$$-\alpha A + \alpha B = \lambda \gamma A - \lambda \gamma B, \\ -\alpha \theta = A(-\alpha + \lambda \gamma) \exp(-\gamma l) + B(-\alpha - \lambda \gamma) \exp(\gamma l). \quad (\text{П2.3})$$

Из первого уравнения системы (П2.3) выражаем

$$B = -A \frac{\alpha + \lambda \gamma}{-\alpha + \lambda \gamma}. \quad (\text{П2.4})$$

Подставим (П2.4) в (П2.3)

$$-\alpha \theta = A(-\alpha + \lambda \gamma) \exp(-\gamma l) + A \frac{\alpha + \lambda \gamma}{\alpha + \lambda \gamma} (\alpha + \lambda \gamma) \exp(\gamma l), \quad (\text{П2.5})$$

тогда

$$-\alpha \theta = A \frac{(-\alpha + \lambda \gamma)^2 \exp(-\gamma l) + (\alpha - \lambda \gamma)^2 \exp(\gamma l)}{-\alpha + \lambda \gamma} \quad (\text{П2.6})$$

и комплексные константы

$$A = \frac{-\alpha \theta (-\alpha + \lambda \gamma)}{(-\alpha + \lambda \gamma)^2 \exp(-\gamma l) + (\alpha + \lambda \gamma)^2 \exp(\gamma l)}, \quad (\text{П2.7})$$

$$B = \frac{\alpha \theta (\alpha + \lambda \gamma)}{(-\alpha + \lambda \gamma)^2 \exp(-\gamma l) + (\alpha + \lambda \gamma)^2 \exp(\gamma l)}. \quad (\text{П2.8})$$

Приложение В

Расчет комплексных амплитуд колебания с нелинейным режимом затухания

Линейные уравнения для определения четырех неизвестных постоянных A_1, B_1, A_2, B_2 записываются в виде (2.28). Для пространственных частей решение для нахождения констант запишется в виде (2.34)

$$-\alpha_1(A_1 + B_1) = -\lambda_1(-\gamma_1 A_1 + \gamma_1 B_1), \quad (2.28)$$

$$\begin{aligned} A_1 \exp(-\gamma_1 x_1) + B_1 \exp(\gamma_1 x_1) &= A_2 \exp(-\gamma_2 x_1) + B_2 \exp(\gamma_2 x_1), \\ \lambda_1(-\gamma_1 A_1 \exp(-\gamma_1 x_1) + \gamma_1 B_1 \exp(\gamma_1 x_1)) &= \lambda_2(-\gamma_2 A_2 \exp(-\gamma_2 x_1) + \gamma_2 B_2 \exp(\gamma_2 x_1)) \\ \alpha_2(1 - A_2 \exp(-\gamma_2 x_2) - B_2 \exp(\gamma_2 x_2)) &= -\lambda_2(-\gamma_2 A_2 \exp(-\gamma_2 x_2) + \gamma_2 B_2 \exp(\gamma_2 x_2)). \\ \alpha_1(A_1 + B_1) &= -\lambda_1(-\gamma_1 A_1 + \gamma_1 B_1), \end{aligned} \quad (2.34)$$

$$\begin{aligned} A_1 \exp(-\gamma_1 x_1) + B_1 \exp(\gamma_1 x_1) &= A_2 \exp(-\gamma_2 x_1) + B_2 \exp(\gamma_2 x_1), \\ \lambda_1(-\gamma_1 A_1 \exp(-\gamma_1 x_1) + \gamma_1 B_1 \exp(\gamma_1 x_1)) &= \\ = \lambda_2(-\gamma_2 A_2 \exp(-\gamma_2 x_1) + \gamma_2 B_2 \exp(\gamma_2 x_1)) + 1000, \\ -\alpha_2(A_2 \exp(-\gamma_2 x_2) + B_2 \exp(\gamma_2 x_2)) &= \lambda_2(-\gamma_2 A_2 \exp(-\gamma_2 x_2) + \gamma_2 B_2 \exp(\gamma_2 x_2)). \end{aligned}$$

Для задачи с переменной внешней температурой, следуя системе уравнений (2.28), введем обозначения $C_1 = \exp(-\gamma_1 x_1)$, $C_2 = \exp(-\gamma_1 x_2)$, $C_3 = \exp(-\gamma_2 x_2)$.

Система уравнений для определения коэффициентов A_1, B_1, A_2, B_2 запишется в виде

$$\begin{pmatrix} -\alpha - \lambda_1 \gamma_1 & -\alpha + \lambda_1 \gamma_1 & 0 & 0 \\ C_1 & 1/C_1 & -C_2 & -1/C_2 \\ -\lambda_1 \gamma_1 C_1 & \lambda_1 \gamma_1 / C_1 & \lambda_2 \gamma_2 C_2 & -\lambda_2 \gamma_2 / C_2 \\ 0 & 0 & (-\alpha + \lambda_2 \gamma_2) C_3 & (-\alpha - \lambda_2 \gamma_2) / C_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_1 \\ B_1 \\ A_2 \\ B_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \alpha \end{pmatrix}. \quad (\text{ПЗ.1})$$

Для задачи с переменным тепловым потоком с учетом отличия уравнения (2.34) от уравнения (2.28), получим

$$\begin{pmatrix} -\alpha - \lambda_1 \gamma_1 & -\alpha + \lambda_1 \gamma_1 & 0 & 0 \\ C_1 & 1/C_1 & -C_2 & -1/C_2 \\ -\lambda_1 \gamma_1 C_1 & \lambda_1 \gamma_1 / C_1 & \lambda_2 \gamma_2 C_2 & -\lambda_2 \gamma_2 / C_2 \\ 0 & 0 & (-\alpha + \lambda_2 \gamma_2) C_3 & (-\alpha - \lambda_2 \gamma_2) / C_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_1 \\ B_1 \\ A_2 \\ B_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1000 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (\text{П3.2})$$

Программа расчета распределения температуры в двухслойной панели с переменной внешней температурой

```
clear
% Программа TERMO21 расчета температуры в двухслойной системе с
% переменной внешней температурой
% Толщина кирпичной стенки x1 [м]
x1=0.05;
% Толщина внешнего воздушного зазора x2-x1 [м]
x2=x1+0.3;
% Коэффициент затухания тепловой волны в кирпиче g1=12.3 [м-1]
g1=12.3+12.3i;gR1=real(g1);
%Коэффициент затухания тепловой волны в воздухе g2=8.43 [м-1]
g2=8.43+8.43i;gR2=real(g2);
% Экспоненциальные коэффициенты c1,c2,c3
c1=exp(-g1*x1);
c2=exp(-g2*x1);
c3=exp(-g2*x2);
% Коэффициент теплопроводности кирпича 0.81 [Вт/(м*К)]
La1=0.81;
% Коэффициент теплопроводности воздуха 0.0258 [Вт/(м*К)]
La2=0.0258;
% Коэффициент теплообмена 1.66*sqrt(DT) [Вт/(м2*К)]
% Разность температур 10 [К]
DT=10; Al=-1.66*sqrt(DT);
% Матрица уравнения H
H=[Al-La1*g1, Al+La1*g1,0,0;
c1,1/c1,-c2,-1/c2;
-La1*g1*c1,La1*g1/c1,La2*g2*c2,-La2*g2/c2;
0,0,(Al+La2*g2)*c3,(Al-La2*g2)/c3];
% Столбец правой части
Y=[0;0;0;Al]
A=H\Y;
phy=0;
y1=0:x1/100:x1;
T1=A(1)*exp(-g1*y1+phy*i)+A(2)*exp(g1*y1+phy*i);
y2=x1:(x2-x1)/100:x2;
T2=A(3)*exp(-g2*y2+phy*i)+A(4)*exp(g2*y2+phy*i);
```



```

RT1=real(T1)
RT2=real(T2)
plot(y1,RT1,y2,RT2)

```

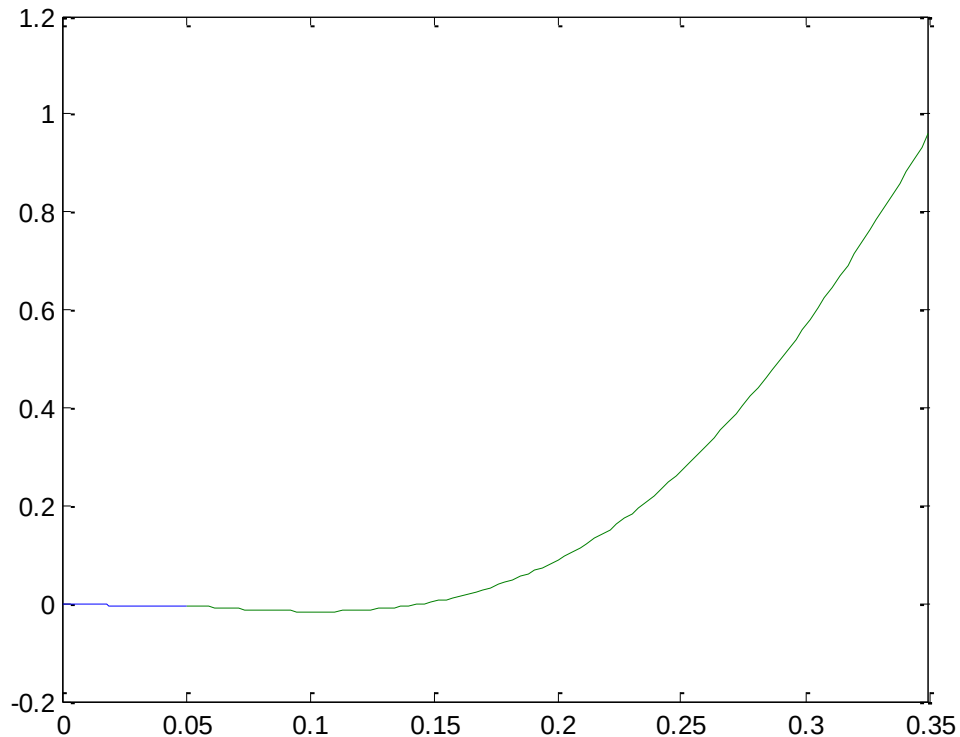


Рисунок П.1. Распределение температуры в двухслойной структуре: толщина кирпича 5 см, толщина воздушного зазора 30 см. Температурный перепад 1К

Программа расчета распределения температуры в двухслойной панели с переменным тепловым потоком

```

% Программа расчета температуры в двухслойной системе с переменным
% тепловым потоком
% Толщина кирпичной стенки x1 [м]
x1=0.05;
% Толщина внешнего воздушного зазора x2-x1 [м]
x2=x1+0.3;
% Коэффициент затухания тепловой волны в кирпиче g1=12.3 [м^{-1}]
g1=12.3+12.3i;gR1=real(g1);
%Коэффициент затухания тепловой волны в воздухе g2=8.43 [м^{-1}]
g2=8.43+8.43i;gR2=real(g2);
% Экспоненциальные коэффициенты c1,c2,c3
phy=0;
c1=exp(-g1*x1);

```

```

c2=exp(-g2*x1);
c3=exp(-g2*x2);
% Коэффициент теплопроводности кирпича 0.81 [Вт/(м*К)]
La1=0.81;
% Коэффициент теплопроводности воздуха 0.0258 [Вт/(м*К)]
La2=0.0258;
% Коэффициент теплообмена 1.66*sqrt(DT) [Вт/(м^2*К)]
% Разность температур 10 [K]
DT=10; Al=-1.66*sqrt(DT);
% Матрица уравнения H
H=[Al-La1*g1, Al+La1*g1,0,0;
c1,1/c1,-c2,-1/c2;
-La1*g1*c1,La1*g1/c1,La2*g2*c2,-La2*g2/c2;
0,0,(Al+La2*g2)*c3,(Al-La2*g2)/c3];
% Столбец правой части
Y=[0;0;1000;0]
A=H\Y;
phy=0;
y1=0:x1/100:x1;
E1=exp(-g1*y1);E2=1./E1;
T1=A(1)*E1+A(2)*E2;
y2=x1:(x2-x1)/100:x2;
E3=exp(-g2*y2);E4=1./E3;
T2=A(3)*E3+A(4)*E4;
RT1=real(T1)
RT2=real(T2)
y1(101)
y2(1)
plot(y1,RT1,y2,RT2)

```

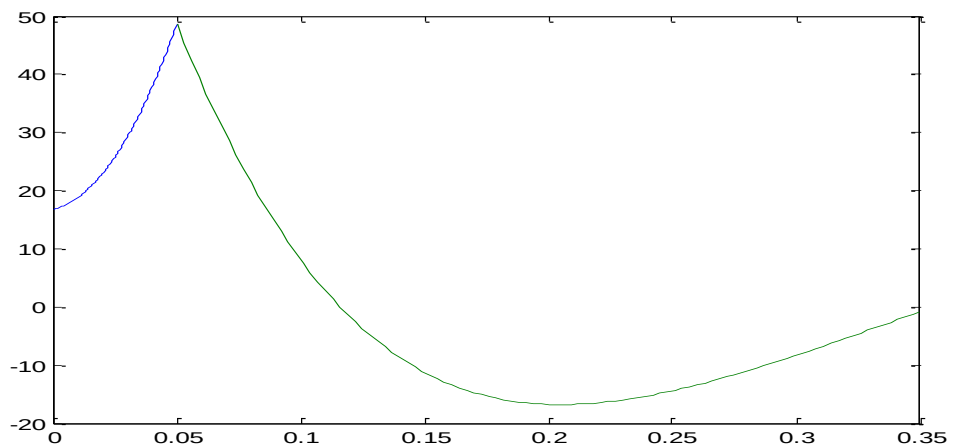


Рисунок П.2. Распределение температуры в двухслойной структуре: толщина кирпича 5 см, толщина воздушного зазора 30 см. Температурный поток с амплитудой $1000 \text{ Вт} / \text{м}^2$

Решение задачи теплопроводности четырехслойной панели с переменной внешней температурой

Для проведения конкретного расчета мы выберем в качестве утеплителя минеральную вату «Роквул» с характеристиками (СНиП 23-02) $\rho = 158 \text{ кг/м}^3$ коэффициент теплопроводности $\lambda = 0,037 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$, удельная теплоемкость $c = 0,84 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$ [33]. Для коэффициента затухания в минеральной вате

$$\sqrt{\frac{c\rho}{2\lambda}} = \sqrt{\frac{840 \cdot 158}{2 \cdot 0,037}} = 1339, \quad \beta = 11,38 \text{ м}^{-1}. \quad \text{Теплофизические постоянные}$$

железобетона: $\rho = 2200 \text{ кг/м}^3$, $\lambda = 1,55 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$, $c = 0,84 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$.

$$\text{Коэффициент затухания в железобетоне } \sqrt{\frac{c\rho}{2\lambda}} = \sqrt{\frac{840 \cdot 2200}{2 \cdot 1,55}} = 772, \quad \beta = 6,56 \text{ м}^{-1}$$

$$\alpha_1(A_1 + B_1) = \lambda_1(-\gamma_1 A_1 + \gamma_1 B_1), \quad (2.36)$$

$$A_1 \exp(-\gamma_1 x_1) + B_1 \exp(\gamma_1 x_1) = A_2 \exp(-\gamma_2 x_1) + B_2 \exp(\gamma_2 x_1),$$

$$\lambda_1(-\gamma_1 A_1 \exp(-\gamma_1 x_1) + \gamma_1 B_1 \exp(\gamma_1 x_1)) = \lambda_2(-\gamma_2 A_2 \exp(-\gamma_2 x_1) + \gamma_2 B_2 \exp(\gamma_2 x_1))$$

$$A_2 \exp(-\gamma_2 x_2) + B_2 \exp(\gamma_2 x_2) = A_3 \exp(-\gamma_3 x_2) + B_3 \exp(\gamma_3 x_2),$$

$$\lambda_2(-\gamma_2 A_2 \exp(-\gamma_2 x_2) + \gamma_2 B_2 \exp(\gamma_2 x_2)) = \lambda_3(-\gamma_3 A_3 \exp(-\gamma_3 x_2) + \gamma_3 B_3 \exp(\gamma_3 x_2)),$$

$$A_3 \exp(-\gamma_3 x_3) + B_3 \exp(\gamma_3 x_3) = A_4 \exp(-\gamma_4 x_3) + B_4 \exp(\gamma_4 x_3),$$

$$\lambda_3(-\gamma_3 A_3 \exp(-\gamma_3 x_3) + \gamma_3 B_3 \exp(\gamma_3 x_3)) = \lambda_4(-\gamma_4 A_4 \exp(-\gamma_4 x_1) + \gamma_4 B_4 \exp(\gamma_4 x_1)),$$

$$\alpha_4(1 - A_4 \exp(-\gamma_4 x_4) - B_4 \exp(\gamma_4 x_4)) = \lambda_4(-\gamma_4 A_4 \exp(-\gamma_4 x_4) + \gamma_4 B_4 \exp(\gamma_4 x_4)).$$

Программа расчета распределения температуры в четырехслойной панели с переменной внешней температурой

```
clear
% Программа TERMO41 расчета температуры в
% четырехслойной панели: минеральная вата,
% воздух, железобетон, воздух с
% переменной внешней температурой
% Толщина минеральной ваты стенки x1 [м]
x1=0.05;
% Толщина внутреннего воздушного зазора x2-x1 [м]
```

```

x2=x1+0.05;
% Толщина внутреннего воздушного зазора x3-x3 [м]
x3=x2+0.1;
% Толщина внутреннего воздушного зазора x4-x3 [м]
x4=x3+0.02;
% Коэффициент затухания тепловой волны в
% минеральной вате g1=11.38 [м-1]
g1=11.38+11.38i;gR1=real(g1);
%Коэффициент затухания тепловой волны в воздухе g2=8.43 [м-1]
g2=8.43+8.43i;gR2=real(g2);
g4=g2;gR4=gR2;
%Коэффициент затухания тепловой волны в ;tktpj,tnjyt g3=6.56 [м-1]
g3=6.56+6.56i;gR3=real(g3);
% Экспоненциальные коэффициенты
% c12,c21,c23,c32,c34,c43,c44
c12=exp(-g1*x1)
c21=exp(-g2*x1)
c23=exp(-g2*x2)
c32=exp(-g3*x2)
c34=exp(-g3*x3)
c43=exp(-g4*x3)
c44=exp(-g4*x4)
% Коэффициент теплопроводности минеральной ваты 0.037 [Вт/(м*К)]
La1=0.037;
% Коэффициент теплопроводности воздуха 0.0258[Вт/(м*К)]
La2=0.0258;La4=La2;
% Коэффициент теплопроводности бетона 1.55 [Вт/(м*К)]
La3=1.55;
% Коэффициент теплообмена 1.66*sqrt(DT) [Вт/(м2*К)]
% Разность температур 10 [K]
DT=10; Al=-1.66*sqrt(DT);
% Матрица уравнения Н размером 8*8
H=[Al-La1*g1, Al+La1*g1,0,0,0,0,0,0;
c12,1/c12,-c21,-1/c21,0,0,0,0;
-La1*g1*c12,La1*g1/c12,La2*g2*c21,-La2*g2/c21,0,0,0,0;
0,0,c23,1/c23,-c32,-1/c32,0,0;
0,0,-La2*g2*c23,La2*g2/c23,La3*g3*c32,-La3*g3/c32,0,0;
0,0,0,0,c34,1/c34,-c43,-1/c43;
0,0,0,0,-La3*g3*c34,La3*g3/c34,La4*g4*c44,-La4*g4/c44;
0,0,0,0,0,(Al+La4*g4)*c44,(Al-La4*g4)/c44]
% Столбец правой части из 8 элементов
Y=[0;0;0;0;0;0;0;Al]
A=H\Y
% Фаза колебания p

```

```

p=0;
y1=0:x1/100:x1;
y2=x1:(x2-x1)/100:x2;
y3=x2:(x3-x2)/100:x3;
y4=x3:(x4-x3)/100:x4;
T1=A(1)*exp(-g1*y1+p*i)+A(2)*exp(g1*y1+p*i);
T2=A(3)*exp(-g2*y2+p*i)+A(4)*exp(g2*y2+p*i);
T3=A(5)*exp(-g3*y3+p*i)+A(6)*exp(g3*y3+p*i);
T4=A(7)*exp(-g4*y4+p*i)+A(8)*exp(g4*y4+p*i);
RT1=real(T1);
RT2=real(T2);
RT3=real(T3);
RT4=real(T4);
plot(y1,RT1,y2,RT2,y3,RT3,y4, RT4)

```

$$\alpha_1(A_1 + B_1) = \lambda_1(-\gamma_1 A_1 + \gamma_1 B_1), \quad (2.37)$$

$$A_1 \exp(-\gamma_1 x_1) + B_1 \exp(\gamma_1 x_1) = A_2 \exp(-\gamma_2 x_1) + B_2 \exp(\gamma_2 x_1),$$

$$\begin{aligned} \lambda_1(-\gamma_1 A_1 \exp(-\gamma_1 x_1) + \gamma_1 B_1 \exp(\gamma_1 x_1)) = \\ = \lambda_2(-\gamma_2 A_2 \exp(-\gamma_2 x_1) + \gamma_2 B_2 \exp(\gamma_2 x_1)), \end{aligned}$$

$$\alpha_2(A_2 \exp(-\gamma_2 x_2) + B_2 \exp(\gamma_2 x_2)) = \lambda_2(-\gamma_2 A_2 \exp(-\gamma_2 x_2) + \gamma_2 B_2 \exp(\gamma_2 x_2)).$$

$$A_1 \exp(-\gamma_1 x_1) + B_1 \exp(\gamma_1 x_1) = A_2 \exp(-\gamma_2 x_1) + B_2 \exp(\gamma_2 x_1),$$

$$\lambda_1(-\gamma_1 A_1 \exp(-\gamma_1 x_1) + \gamma_1 B_1 \exp(\gamma_1 x_1)) = \lambda_2(-\gamma_2 A_2 \exp(-\gamma_2 x_1) + \gamma_2 B_2 \exp(\gamma_2 x_1))$$

$$A_2 \exp(-\gamma_2 x_2) + B_2 \exp(\gamma_2 x_2) = A_3 \exp(-\gamma_3 x_2) + B_3 \exp(\gamma_3 x_2),$$

$$\lambda_2(-\gamma_2 A_2 \exp(-\gamma_2 x_2) + \gamma_2 B_2 \exp(\gamma_2 x_2)) = \lambda_3(-\gamma_3 A_3 \exp(-\gamma_3 x_2) + \gamma_3 B_3 \exp(\gamma_3 x_2)),$$

$$A_3 \exp(-\gamma_3 x_3) + B_3 \exp(\gamma_3 x_3) = A_4 \exp(-\gamma_4 x_3) + B_4 \exp(\gamma_4 x_3),$$

$$\begin{aligned} \lambda_3(-\gamma_3 A_3 \exp(-\gamma_3 x_3) + \gamma_3 B_3 \exp(\gamma_3 x_3)) = \\ = \lambda_4(-\gamma_4 A_4 \exp(-\gamma_4 x_1) + \gamma_4 B_4 \exp(\gamma_4 x_1)) + 1000, \end{aligned}$$

$$\alpha_4(A_4 \exp(-\gamma_4 x_4) + B_4 \exp(\gamma_4 x_4)) = \lambda_4(-\gamma_4 A_4 \exp(-\gamma_4 x_4) + \gamma_4 B_4 \exp(\gamma_4 x_4)).$$

Программа расчета распределения температуры в четырехслойной панели с переменным тепловым потоком

```

clear
% Программа TERMO42 расчета температуры в
% четырехслойной панели: минеральная вата,

```

```

% воздух, железобетон, воздух с
% переменным тепловым потоком амплитудой 500 Вт/см^2
% Толщина минеральной ваты стенки x1 [м]
x1=0.05;
% Толщина внутреннего воздушного зазора x2-x1 [м]
x2=x1+0.05;
% Толщина внутреннего воздушного зазора x3-x3 [м]
x3=x2+0.1;
% Толщина внутреннего воздушного зазора x4-x3 [м]
x4=x3+0.05;
% Коэффициент затухания тепловой волны в
% минеральной вате g1=11.38 [м^-1]
g1=11.38+11.38i;gR1=real(g1);
%Коэффициент затухания тепловой волны в воздухе g2=8.43 [м^-1]
g2=8.43+8.43i;gR2=real(g2);
g4=g2;gR4=gR2;
%Коэффициент затухания тепловой волны в ;tktpj,tjyt g3=6.56 [м^-1]
g3=6.56+6.56i;gR3=real(g3);
% Экспоненциальные коэффициенты
% c12,c21,c23,c32,c34,c43,c44
c12=exp(-g1*x1)
c21=exp(-g2*x1)
c23=exp(-g2*x2)
c32=exp(-g3*x2)
c34=exp(-g3*x3)
c43=exp(-g4*x3)
c44=exp(-g4*x4)
% Коэффициент теплопроводности минеральной ваты 0.037 [Вт/(м*K)]
La1=0.037;
% Коэффициент теплопроводности воздуха 0.0258[Вт/(м*K)]
La2=0.0258;La4=La2;
% Коэффициент теплопроводности бетона 1.55 [Вт/(м*K)]
La3=1.55;
% Коэффициент теплообмена 1.66*sqrt(DT) [Вт/(м^2*K)]
% Разность температур 10 [K]
DT=10; Al=-1.66*sqrt(DT);
% Матрица уравнения Н размером 8*8
H=[Al-La1*g1, Al+La1*g1,0,0,0,0,0,0;
c12,1/c12,-c21,-1/c21,0,0,0,0;
-La1*g1*c12,La1*g1/c12,La2*g2*c21,-La2*g2/c21,0,0,0,0;
0,0,c23,1/c23,-c32,-1/c32,0,0;
0,0,-La2*g2*c23,La2*g2/c23,La3*g3*c32,-La3*g3/c32,0,0;
0,0,0,0,c34,1/c34,-c43,-1/c43;
0,0,0,0,-La3*g3*c34,La3*g3/c34,La4*g4*c44,-La4*g4/c44;

```

```

0,0,0,0,0,0,(Al+La4*g4)*c44,(Al-La4*g4)/c44]
% Столбец правой части из 8 элементов
Y=[0;0;0;0;0;0;500;0]
A=H\Y
% Фаза колебания p
p=0;
y1=0:x1/100:x1;
y2=x1:(x2-x1)/100:x2;
y3=x2:(x3-x2)/100:x3;
y4=x3:(x4-x3)/100:x4;
T1=A(1)*exp(-g1*y1+p*i)+A(2)*exp(g1*y1+p*i);
T2=A(3)*exp(-g2*y2+p*i)+A(4)*exp(g2*y2+p*i);
T3=A(5)*exp(-g3*y3+p*i)+A(6)*exp(g3*y3+p*i);
T4=A(7)*exp(-g4*y4+p*i)+A(8)*exp(g4*y4+p*i);
RT1=real(T1);
RT2=real(T2);
RT3=real(T3);
RT4=real(T4);
plot(y1,RT1,y2,RT2,y3,RT3,y4, RT4)

```

Нахождение постоянных коэффициентов для расчета распределения температур

Учитывая кусочную линейность решений полное решение ищем в виде совокупности линейных функций. Подставляя эти решения в граничные условия, получаем систему уравнений для определения постоянных коэффициентов:

$$\alpha_1 a_1 - \lambda_1 b_1 = 0, \quad (2.38)$$

$$\lambda_1 b_1 - \lambda_2 b_2 = 0,$$

$$a_1 + b_1 x_1 - a_2 - b_2 x_1 = 0,$$

$$\lambda_2 b_2 - \lambda_3 b_3 = 0,$$

$$a_2 + b_2 x_2 - a_3 - b_3 x_2 = 0,$$

$$\lambda_3 b_3 - \lambda_4 b_4 = 0,$$

$$a_3 + b_3 x_3 - a_4 - b_4 x_3 = 0,$$

$$\alpha_4 a_4 + (\alpha_4 x_4 + \lambda_4) b_4 = \alpha_4 T_{\text{ext}}$$

Программа расчета распределения температуры в четырехслойной панели с постоянным перепадом температур

```
clear
% Программа TERMO43 расчета температуры в
% четырехслойной панели: минеральная вата,
% воздух, железобетон, воздух с
% постоянной разностью температур TE=10K
TE=10;
% Толщина минеральной ваты стенки x1 [м]
x1=0.05;
% Толщина внутреннего воздушного зазора x2-x1 [м]
x2=x1+0.05;
% Толщина внутреннего воздушного зазора x3-x2 [м]
x3=x2+0.1;
% Толщина внутреннего воздушного зазора x4-x3 [м]
x4=x3+0.05;
% Коэффициент теплопроводности минеральной ваты 0.037 [Вт/(м*К)]
La1=0.037;
% Коэффициент теплопроводности воздуха 0.0258[Вт/(м*К)]
La2=0.0258;La4=La2;
```



```

% Коэффициент теплопроводности бетона 1.55 [Вт/(м*К)]
La3=1.55;
% Коэффициент теплообмена 1.66*sqrt(DT) [Вт/(м^2*К)]
% Разность температур 10 [K]
DT=10; Al=1.66*sqrt(DT);
% Матрица уравнения H размером 8*8
H=[Al, -La1,0,0,0,0,0,0;
0,La1,0,-La2,0,0,0,0;
1,x1,-1,-x1,0,0,0,0;
0,0,0,La2,0,-La3,0,0;
0,0,1,x2,-1,-x2,0,0;
0,0,0,0,0,La3,0,-La4;
0,0,0,0,1,x3,-1,-x3;
0,0,0,0,0,Al,Al*x4+La4]
% Столбец правой части из 8 элементов
Y=[0;0;0;0;0;0;0;Al*TE]
A=H\Y
y1=0:x1/100:x1;
y2=x1:(x2-x1)/100:x2;
y3=x2:(x3-x2)/100:x3;
y4=x3:(x4-x3)/100:x4;
T1=A(1)+A(2)*y1;
T2=A(3) +A(4)*y2;
T3=A(5) +A(6)*y3;
T4=A(7) +A(8)*y4;
plot(y1,T1,y2,T2,y3,T3,y4,T4)

```

$$\alpha_1 a_1 - \lambda_1 b_1 = 0, \quad (39)$$

$$\lambda_1 b_1 - \lambda_2 b_2 = 0,$$

$$a_1 + b_1 x_1 - a_2 - b_2 x_1 = 0,$$

$$\lambda_2 b_2 - \lambda_3 b_3 = 0,$$

$$a_2 + b_2 x_2 - a_3 - b_3 x_2 = 0,$$

$$\lambda_3 b_3 - \lambda_4 b_4 = 1000,$$

$$a_3 + b_3 x_3 - a_4 - b_4 x_3 = 0,$$

$$\alpha_4 a_4 + (\alpha_4 x_4 + \lambda_4) b_4 = 0$$

Программа расчета распределения температуры в четырехслойной панели с постоянным поглощаемым потоком

```

clear
% Программа TERMO43 расчета температуры в
% четырехслойной панели: минеральная вата,
% воздух, железобетон, воздух с
% постоянным поглощаемым потоком 1000 Вт/ м^2
F=1000;
% Толщина минеральной ваты стенки x1 [м]
x1=0.05;
% Толщина внутреннего воздушного зазора x2-x1 [м]
x2=x1+0.05;
% Толщина внутреннего воздушного зазора x3-x2 [м]
x3=x2+0.1;
% Толщина внутреннего воздушного зазора x4-x3 [м]
x4=x3+0.05;
% Коэффициент теплопроводности минеральной ваты 0.037 [Вт/(м*К)]
La1=0.037;
% Коэффициент теплопроводности воздуха 0.0258[Вт/(м*К)]
La2=0.0258;La4=La2;
% Коэффициент теплопроводности бетона 1.55 [Вт/(м*К)]
La3=1.55;
% Коэффициент теплообмена 1.66*sqrt(DT) [Вт/(м^2*К)]
% Разность температур 10 [K]
DT=10; Al=1.66*sqrt(DT);
% Матрица уравнения H размером 8*8
H=[Al, -La1,0,0,0,0,0,0;
0,La1,0,-La2,0,0,0,0;
1,x1,-1,-x1,0,0,0,0;
0,0,0,La2,0,-La3,0,0;
0,0,1,x2,-1,-x2,0,0;
0,0,0,0,La3,0,-La4;
0,0,0,0,1,x3,-1,-x3;
0,0,0,0,0,Al,Al*x4+La4]
% Столбец правой части из 8 элементов
Y=[0;0;0;0;0;F;0;0]
A=H\Y
y1=0:x1/100:x1;
y2=x1:(x2-x1)/100:x2;
y3=x2:(x3-x2)/100:x3;
y4=x3:(x4-x3)/100:x4;
T1=A(1)+A(2)*y1;
T2=A(3) +A(4)*y2;
T3=A(5) +A(6)*y3;
T4=A(7) +A(8)*y4;
plot(y1,T1,y2,T2,y3,T3,y4,T4)

```

Приложение Е

Локальный сметный расчет

таблица П1

Возведение кирпичной стены толщиной 0,54 м и с установкой фасада из вентфасада

1	ФЕР15-01-090-03 <i>Приказ Минстроя РФ от 30.01.14 №31/пр</i>	Устройство вентилируемых фасадов с облицовкой плитами из керамогранита: с устройством теплоизоляционного слоя (100 м2 облицовки) <i>НР (4179 руб.): 105% от ФОТ</i> <i>СП (2189 руб.): 55% от ФОТ</i>	1 <i>100 / 100</i>	6245,56 3551,8	2693,76 427,81		6246	3552	2694 428	
<i>Н</i>	1. 101-2496	Лента двухсторонняя, (кг)	0	30,4		30,4				
<i>Н</i>	2. 101-5484	Дюбель распорный, марка IZM, размер 10x200 мм, (100 шт.)	0	83,68		83,68				
<i>Н</i>	3. 101-9243	Материал гидроветрозащитный, (м2)	103 103							
<i>Н</i>	4. 104-9281	Утеплитель, (м3)	0							

Продолжение таблицы П1

<i>H</i>	5. 201-9033	Конструкции металлические и элементы крепежные вентилируемых фасадов, (компл.)	0							
<i>H</i>	6. 412-9180	Плиты облицовочные, (м2)	98 98							
2	ФССЦ-101-7195 <i>Приказ Минстроя России от 12.11.14 №703/пр</i>	ИЗОСПАН: АМ (10 м2)	103	52,6		52,6	5418			5418
3	ФССЦ-101-5594 <i>Приказ Минстроя России от 12.11.14 №703/пр</i>	Плитки керамогранитные размером: 600х600х10 мм, бело-серые (м2)	98	85		85	8330			8330
4	Цена поставщика	Несущий каркас (м2)	100	44,67 350/1,18/6,64		44,67 350/1,18/6,64	4467			4467

Окончание таблицы П1

5	ФССЦ-104-0111 <i>Приказ Минстроя России от 12.11.14 №703/пр</i>	Плиты или маты теплоизоляционные (м3)	0,11 <i>0.1*1.1</i>	542,4		542,4	60			60
6	ФЕР08-02-001-03 <i>Приказ Минстроя РФ от 30.01.14 №31/пр</i>	Кладка стен кирпичных наружных: средней сложности при высоте этажа до 4 м (1 м3 кладки) <i>НР (3615 руб.): 122% от ФОТ</i> <i>СП (2370 руб.): 80% от ФОТ</i>	54 <i>100*0,54</i>	911,94 49,47	34,56 5,4	827,91	49245	2671	1866 292	44708
Итого прямые затраты по разделу в ценах 2001г.							73766	6223	4560	62983
Накладные расходы							7794			
Сметная прибыль							4568			
Итоги в базисном уровне цен							86128			

Возведение кирпичной стены толщиной 0,38 м и с установкой фасада из стеклопакетов

№ пп	Шифр и номер позиции норматива	Наименование работ и затрат, единица измерения	Количество	Стоимость единицы, руб.			Общая стоимость, руб.			
				всего	эксплуата- ции машин	мате- риалы	Всего	оплаты труда	эксплуата- ции машин	мате- риалы
				оплаты труда	в т.ч. оплаты труда				в т.ч. оплаты труда	
1	ФЕР09-04-010-03 <i>Приказ Минстроя РФ от 30.01.14 №31/пр</i>	Монтаж навесных панелей фасадов из герметичных стеклопакетов в пластиковой или алюминиевой обвязке (100 м2) <i>НР (32 руб.): 90% от ФОТ СП (30 руб.): 85% от ФОТ</i>	0,01 <i>1 / 100</i>	4039,19 3201,48	822,94 261,9	14,77	40	32	8 3	
<i>Н</i>	1. 101-1810	Винты самонарезающие: для крепления профилированного настила и панелей к несущим конструкциям, (т)	0	35011		35011				

Продолжение таблицы П2

<i>Н</i>	2. 206-9001	Витражи из алюминиевых сплавов с нащельниками и сливами, (м2)	100 1							
2	ФССЦ- 203-0938 <i>Приказ Минстроя России от 12.11.14 №703/пр</i>	Блок оконный пластиковый: глухой, одностворчатый с однокамерным стеклопакетом (24 мм), площадью до 2 м2 (м2)	100	1200		1200	120000			120000
3	ФЕР08-02- 001-03 <i>Приказ Минстроя РФ от 30.01.14 №31/пр</i>	Кладка стен кирпичных наружных: средней сложности при высоте этажа до 4 м (1 м3 кладки) <i>НР (2544 руб.): 122% от ФОТ СП (1668 руб.): 80% от ФОТ</i>	38 <i>100*0,38</i>	911,94 49,47	34,56 5,4	827,91	34654	1880	1313 205	31461

Продолжение таблицы П2

4	ФЕР26-01-036-01 <i>Приказ Минстроя РФ от 30.01.14 №31/пр</i>	Изоляция изделиями из волокнистых и зернистых материалов с креплением на клее и дюбелями холодных поверхностей: наружных стен (100 м2 поверхности) <i>НР (132 руб.): 100% от ФОТ</i> <i>СП (92 руб.): 70% от ФОТ</i>	1 <i>100 / 100</i>	247,16 132,33	9,38 0,41	105,45	247	132	9	106
<i>Н</i>	1. 101-2797	Дюбель распорный с металлическим стержнем: 10х150 мм, (10 шт.)	0	6,62		6,62				
<i>Н</i>	2. 104-9100	Плиты теплоизоляционные, (м3)	0							
5	ФССЦ-104-0111 <i>Приказ Минстроя России от 12.11.14 №703/пр</i>	Плиты или маты теплоизоляционные (м3)	0,11 <i>0.1*1.1</i>	542,4		542,4	60			60

6	ФССЦ-101-2797 <i>Приказ Минстроя России от 12.11.14 №703/пр</i>	Дюбель распорный с металлическим стержнем: 10х150 мм (10 шт.)	70 <i>(100*7) / 10</i>	6,62		6,62	463			463
Итого прямые затраты по разделу в ценах 2001г.							155464	2044	1330 208	152090
Накладные расходы							2708			
Сметная прибыль							1790			
Итоги в базисном уровне цен							159962			

Таблица ПЗ

Возведение монолитной железобетонной стены толщиной 0,5 м и с установкой вентфасадов

№ пп	Шифр и номер позиции норматива	Наименование работ и затрат, единица измерения	Количество	Стоимость единицы, руб.			Общая стоимость, руб.			
				всего	эксплуата- ции машин	мате- риалы	Всего	оплаты труда	эксплуата- ции машин	мате- риалы
				оплаты труда	в т.ч. оплаты труда				в т.ч. оплаты труда	
1	ФЕР15-01-090-03 <i>Приказ Минстроя РФ от 30.01.14 №31/пр</i>	Устройство вентилируемых фасадов с облицовкой плитами из керамогранита: с устройством теплоизоляционного слоя (100 м2 облицовки) <i>НР (4179 руб.): 105% от ФОТ СП (2189 руб.): 55% от ФОТ</i>	1 <i>100 / 100</i>	6245,56 3551,8	2693,76 427,81		6246	3552	2694 428	
<i>Н</i>	1. 101-2496	Лента двухсторонняя, (кг)	0	30,4		30,4				
<i>Н</i>	2. 101-5484	Дюбель распорный, марка IZM, размер 10х200 мм, (100 шт.)	0	83,68		83,68				

Продолжение таблицы ПЗ

<i>H</i>	3. 101-9243	Материал гидроветрозащитный, (м2)	103 103							
<i>H</i>	4. 104-9281	Утеплитель, (м3)	0							
<i>H</i>	5. 201-9033	Конструкции металлические и элементы крепежные вентилируемых фасадов, (компл.)	0							
<i>H</i>	6. 412-9180	Плиты облицовочные, (м2)	98 98							
2	ФССЦ-101-7195 <i>Приказ Минстроя России от 12.11.14 №703/пр</i>	ИЗОСПАН: АМ (10 м2)	103	52,6		52,6	5418			5418
3	ФССЦ-101-5594 <i>Приказ Минстроя России от 12.11.14 №703/пр</i>	Плитки керамогранитные размером: 600х600х10 мм, бело- серые (м2)	98	85		85	8330			8330

Окончание таблицы ПЗ

4	Цена поставщика	Несущий каркас (м2)	100	44,67 350/1,18/6,64		44,67 350/1,18/6,64	4467			4467
5	ФССЦ-104-0111 <i>Приказ Минстроя России от 12.11.14 №703/пр</i>	Плиты или маты теплоизоляционные (м3)	0,11 0.1*1.1	542,4		542,4	60			60
6	ФЕР06-01-031-05 <i>Приказ Минстроя России от 12.11.14 №703/пр</i>	Устройство железобетонных стен и перегородок высотой: до 3 м, толщиной 500 мм (100 м3 железобетона в деле) <i>НР (4643 руб.): 105% от ФОТ</i> <i>СП (2874 руб.): 65% от ФОТ</i>	0,54 (100*0,54) / 100	146280,31 7446,83	6306,88 742,48	132526,6	78991	4021	3406 401	71564
Итого прямые затраты по разделу в ценах 2001г.							103512	7573	6100 829	89839
Накладные расходы							8822			
Сметная прибыль							5063			
Итоги в базисном уровне цен							117397			

Таблица П4

Возведение монолитной железобетонной стены толщиной 0,3 м и с установкой фасада из стеклопакета

№ пп	Шифр и номер позиции норматива	Наименование работ и затрат, единица измерения	Количество	Стоимость единицы, руб.			Общая стоимость, руб.			
				всего	эксплуата- ции машин	мате- риалы	Всего	оплаты труда	эксплуата- ции машин	мате- риалы
				оплаты труда	в т.ч. оплаты труда				в т.ч. оплаты труда	
1	ФЕР09-04-010-03 <i>Приказ Минстроя РФ от 30.01.14 №31/пр</i>	Монтаж навесных панелей фасадов из герметичных стеклопакетов в пластиковой или алюминиевой обвязке (100 м2) <i>НР (32 руб.): 90% от ФОТ СП (30 руб.): 85% от ФОТ</i>	0,01 <i>1 / 100</i>	4039,19 3201,48	822,94 261,9	14,77	40	32	8 3	

<i>H</i>	1. 101-1810	Винты самонарезающие: для крепления профилированного настила и панелей к несущим конструкциям, (т)	0	35011		35011				
<i>H</i>	2. 206-9001	Витражи из алюминиевых сплавов с нащельниками и сливами, (м2)	100 1							
2	ФССЦ-203-0938 <i>Приказ Минстроя России от 12.11.14 №703/пр</i>	Блок оконный пластиковый: глухой, одностворчатый с однокамерным стеклопакетом (24 мм), площадью до 2 м2 (м2)	100	1200		1200	120000			120000

Продолжение таблицы П4

3	ФЕР06-01-031-04 <i>Приказ Минстроя России от 12.11.14 №703/пр</i>	Устройство железобетонных стен и перегородок высотой: до 3 м, толщиной 300 мм (100 м3 железобетона в деле) <i>НР (3546 руб.): 105% от ФОТ</i> <i>СП (2195 руб.): 65% от ФОТ</i>	0,3 <i>(100*0,3) / 100</i>	167726,04 10192,59	8900,54 1063,42	148632,91	50318	3058	2670 319	44590
4	ФЕР26-01-036-01 <i>Приказ Минстроя РФ от 30.01.14 №31/пр</i>	Изоляция изделиями из волокнистых и зернистых материалов с креплением на клее и дюбелями холодных поверхностей: наружных стен (100 м2 поверхности) <i>НР (132 руб.): 100% от ФОТ</i> <i>СП (92 руб.): 70% от ФОТ</i>	1 <i>100 / 100</i>	247,16 132,33	9,38 0,41	105,45	247	132	9	106

Окончание таблицы П4

<i>H</i>	1. 101-2797	Дюбель распорный с металлическим стержнем: 10x150 мм, (10 шт.)	0	6,62		6,62				
<i>H</i>	2. 104-9100	Плиты теплоизоляционные, (м3)	0							
5	ФССЦ-104-0111 <i>Приказ Минстроя России от 12.11.14 №703/пр</i>	Плиты или маты теплоизоляционные (м3)	0,11 <i>0.1*1.1</i>	542,4		542,4	60			60
6	ФССЦ-101-2797 <i>Приказ Минстроя России от 12.11.14 №703/пр</i>	Дюбель распорный с металлическим стержнем: 10x150 мм (10 шт.)	70 <i>(100*7) / 10</i>	6,62		6,62	463			463
Итого прямые затраты по разделу в ценах 2001г.							171128	3222	2687 322	165219
Накладные расходы							3710			
Сметная прибыль							2317			
Итоги в базисном уровне цен							177155			

Ремонт вентфасадов, 100м2

№ пп	Шифр и номер позиции норматива	Наименование работ и затрат, единица измерения	Количество	Стоимость единицы, руб.			Общая стоимость, руб.			
				всего	эксплуата- ции машин	мате- риалы	Всего	оплаты труда	эксплуата- ции машин	мате- риалы
				оплаты труда	в т.ч. оплаты труда				в т.ч. оплаты труда	
1	ТЕР15-01-090-03 <i>Приказ ДАСП Воронеж.обл. от 03.03.15 №61-02-03-30</i>	Демонтаж вентилируемых фасадов с облицовкой плитами из керамогранита: с устройством теплоизоляционного слоя (100 м2 облицовки) (ПЗ=0,7 (ОЗП=0,7; ЭМ=0,7 к расх.; ЗПМ=0,7; МАТ=0 к расх.; ТЗ=0,7; ТЗМ=0,7)) НР (2497,25 руб.): 105%*0.9 от ФОТ СП (1235,41 руб.): 55%*0.85 от ФОТ	1	4226,08 2375,13	1850,95 267,46		4226,08	2375,13	1850,95 267,46	

Продолжение таблицы П5

<i>H</i>	1. 101-2496	Лента двухсторонняя, (кг)	0	30,4		30,4				
<i>H</i>	2. 101-5484	Дюбель распорный, марка IZM, размер 10х200 мм, (100 шт.)	0	70,04		70,04				
<i>H</i>	3. 101-9243	Материал гидроветрозащитный, (м2)	0							
<i>H</i>	4. 104-9281	Утеплитель, (м3)	0							
<i>H</i>	5. 201-9033	Конструкции металлические и элементы крепежные вентилируемых фасадов, (компл.)	0							
<i>H</i>	6. 412-9180	Плиты облицовочные, (м2)	0							

Продолжение таблицы П5

2	ТЕР15-01-090-03 <i>Приказ ДАСП Воронеж.обл. от 03.03.15 №61-02-03-30</i>	Устройство вентилируемых фасадов с облицовкой плитами из керамогранита: с устройством теплоизоляционного слоя (100 м2 облицовки) <i>НР (3567,49 руб.): 105%*0.9 от ФОТ СП (1764,87 руб.): 55%*0.85 от ФОТ</i>	1	6037,25 3393,04	2644,21 382,08		6037,25	3393,04	2644,21 382,08	
<i>Н</i>	1. 101-2496	Лента двухсторонняя, (кг)	0	30,4		30,4				
<i>Н</i>	2. 101-5484	Дюбель распорный, марка IZM, размер 10х200 мм, (100 шт.)	0	70,04		70,04				
<i>Н</i>	3. 101-9243	Материал гидроветрозащитный, (м2)	103 103							
<i>Н</i>	4. 104-9281	Утеплитель, (м3)	0							

Продолжение таблицы П5

<i>H</i>	5. 201-9033	Конструкции металлические и элементы крепежные вентилируемых фасадов, (компл.)	0							
<i>H</i>	6. 412-9180	Плиты облицовочные, (м2)	98 98							
3	ФССЦ-101-7195 <i>Приказ Минстроя России от 12.11.14 №703/пр</i>	ИЗОСПАН: АМ (10 м2)	103	52,6		52,6	5417,8			5417,8
4	ФССЦ-101-5594 <i>Приказ Минстроя России от 12.11.14 №703/пр</i>	Плитки керамогранитные размером: 600х600х10 мм, бело-серые (м2)	98	85		85	8330			8330

5	ФССЦ-104-0111 <i>Приказ Минстроя России от 12.11.14 №703/пр</i>	Плиты или маты теплоизоляционные (м3)	0,11 <i>0.1*1.1</i>	542,4		542,4	59,66			59,66
Итого прямые затраты по разделу в ценах 2001г.							24071	5768	4495,16 649,54	13807
Накладные расходы							6065			
Сметная прибыль							3000			
Итоги в базисном уровне цен							33136			

Патент на изобретение

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ
НА ИЗОБРЕТЕНИЕ
№ 2604119

СОЛНЕЧНЫЙ ТЕПЛОВОЙ КОЛЛЕКТОР

Патентообладатель(и): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Воронежский государственный технический университет" (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2015106253
Приоритет изобретения 24 февраля 2015 г.
Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 14 ноября 2016 г.
Срок действия патента истекает 24 февраля 2035 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Изюмов Г.П. Изюмов

Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО
о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2018612863

**Программа расчета температуры в четырехслойной панели
с переменным тепловым потоком**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования «Воронежский
государственный технический университет» (RU)*

Авторы: *Шенс Роман Александрович (RU), Яременко Сергей
Анатольевич (RU), Щукина Татьяна Васильевна (RU), Агафонов
Михаил Владимирович (RU)*



Заявка № **2017660677**
Дата поступления **23 октября 2017 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **01 марта 2018 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 **Г.П. Ивлиев**

Материалы по использованию результатов работы

Общество с ограниченной ответственностью «СтройИмпульс»

394026 Воронежская обл, Воронеж г. Московский пр-кт, дом 7, корпус Е, оф.338

ИНН 3662180978 КПП 366201001 ОГРН 1123668048547

р/сч. 40702810513000064046

Центрально-Черноземный банк Сбербанка России г.Воронеж

БИК 042007681, кор/счет 30101810600000000681

т. (473)200-22-23, т./ф. (473)262-28-09

21 августа 2018 г.

г. Воронеж

АКТ

О внедрение результатов диссертационной работы

Шепса Романа Александровича

«Повышение эффективности энергоактивных ограждающих конструкций на основе использования солнечной радиации»

Комиссия в составе:

Председатель:	Директор — Шиндяпин Дмитрий Александрович
Члены комиссии:	Начальник отдела продаж - Кретинин Александр Вячеславович
	Инженер - Суздальцев Алексей Александрович

Настоящий акт составлен о том, что результаты научно-исследовательской работы Шепса Романа Александровича «Повышение эффективности энергоактивных ограждающих конструкций на основе использования солнечной радиации», представленного на соискание ученой степени кандидата технических наук используются в настоящее время в ООО «СТРОЙИМПУЛЬС» при проектировании и строительстве энергоэффективных зданий со светопропускающими фасадами.

Использование результатов позволило:

1. Спроектировать и построить энергоэффективное здание по адресу г. Воронеж пр-т Патриотов 27г.

Результаты научной работы были использованы для проектирования ограждающих конструкций здания, а также подбора наиболее оптимальных строительных материалов.

2. Снизить эксплуатационные затраты на отопление здания по адресу г. Воронеж пр-т Патриотов 27г.

Применение энергоэффективных строительных конструкций способных аккумулировать солнечную энергию позволили достичь экономии в размере 653 тыс. рублей в ценах 2018 года на отопления здания в течение отопительного периода.

Таким образом, результаты, представленные в научно-исследовательской работе Шепса Романа Александровича, обладают высокой степенью точности расчетов и позволяют подобрать наиболее энергоэффективную ограждающую конструкцию в требуемых климатических зонах, а также позволяют снизить эксплуатационные расходы по содержанию зданий.

Члены комиссии: _____ Шиндяпин Дмитрий Александрович

— _____ Кренин Александр Вячеславович

— _____ Суздальцев Алексей Александрович

Соискатель: _____ Шепс Роман Александрович

—

