

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»



На правах рукописи

**ШАРОВАРОВА Екатерина Петровна**

**Солнечно-геотермальное энергоснабжение зданий  
с энергоэффективными фасадными конструкциями**

05.14.08 – Энергоустановки на основе возобновляемых видов энергии

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2021

Работа выполнена на кафедре «Системы автоматизированного проектирования объектов строительства» ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент,  
**АЛЕХИН Владимир Николаевич**

Официальные оппоненты:

**НИЗОВЦЕВ Михаил Иванович**, доктор технических наук, ФГБУН Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук г. Новосибирск, заведующий лабораторией проблем энергосбережения;

**ВЕЛЬКИН Владимир Иванович**, доктор технических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, профессор кафедры атомных станций и возобновляемых источников энергии;

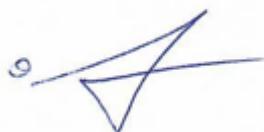
**ХАИТ Анатолий Вильич**, кандидат технических наук, Ариэльский университет, г. Ариэль, Израиль, лектор Департамента машиностроения и мехатроники Инженерного факультета

Защита состоится 16 декабря 2021 г. в 16:30 ч на заседании диссертационного совета УрФУ 05.03.04 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», адрес объявления на сайте УрФУ <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=3034>

Автореферат разослан « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2021 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Ташлыков Олег Леонидович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Возобновляемая энергетика – динамично развивающаяся отрасль во многих странах. К примеру, в соответствии со стратегией ЕС, к 2050 году Евросоюз планирует полностью отказаться от нефти, газа и угля в пользу возобновляемой энергии. С 2023 года в Берлине вступает в силу закон, обязывающий застройщиков устанавливать солнечные батареи на крышах или фасадах всех столичных зданий. В России за последний год сократилась добыча угля и нефти сократилась более, чем на 5%. Доля ВИЭ на сегодняшний день составляет около 1% в общем энергобалансе России, при благоприятном прогнозе доля ВИЭ может вырасти до 5% к 2035 году.

Основную долю энергии в геосфере составляют солнечная и геотермальная энергия. Согласно оценкам Института Энергетической Стратегии, потенциал солнечной энергетике в Российской Федерации оценивается в 2300 млрд. т.у.т. Ресурсный потенциал геотермальной энергии признается таким же неисчерпаемым, как и солнечной. Имеются оценки, согласно которым потенциал геотермальной энергии в России превышает запасы органического топлива более, чем в 10 раз. Развитие технологий в области солнечной энергетике и строительства позволяют создавать ограждающие конструкции, выполняющие одновременно теплозащитные и энергогенерирующие функции. В связи с этим немалую актуальность приобретают здания с комплексом возобновляемых источников энергии. Высокая эффективность использования возобновляемых источников энергии в зданиях достигается в случае применения ограждающих конструкций с высокими теплоизолирующими характеристиками. Поскольку вклад возобновляемой энергии нередко ограничен по различным причинам, здание должно иметь наименьшие потери энергии.

Строительство и эксплуатация зданий потребляют до половины всей выработанной энергии в мире. Наибольший синергетический эффект от использования возобновляемых источников энергии достигается при комплексной оптимизации характеристик энергопотребителя и энергоисточника. Совместная работа по разработке эффективных ограждающих конструкций и внедрению возобновляемых источников энергии для работы инженерных систем зданий и сооружений позволит значительно сократить энергопотребление и повысить эффективность энергосистем на основе ВИЭ.

В связи с этим актуальным является создание технологий энергоснабжения с использованием возобновляемых видов энергии в зданиях с энергоэффективными ограждающими конструкциями.

**Степень разработанности темы исследования.** Исследованиями в области использования возобновляемых источников энергии для энергоснабжения зданий и разработкой энергоустановок на базе возобновляемых источников энергии занимались следующие российские ученые: Д.С. Стребков, Н.П. Селиванов, А.Н. Сахаров, И.И. Анисимова, В.В. Елистратов, О.С. Попель, Е.В. Сарнацкий, А.Б. Алхасов, В.А. Бутузov, В.И. Велькин, С.Е. Щеклеин, Е.В. Брянцева, П.П. Безруких, А.И. Сидельников, А.В. Тихонов, В.С. Афонин, С.Н. Мартыросов, А.И. Мелуа, С.В. Золокей, Я.М. Щелоков, С.О. Филатов, В.М. Пахалуев и другие.

**Целью диссертационной работы** является разработка системы использования геотермальной энергии для создания дополнительной тепловой оболочки вокруг здания с использованием новой системы вентилируемого фасада для применения в практике зеленого строительства.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Провести анализ поступления солнечной радиации на поверхности грунта и зданий для условий Уральского региона.
2. Провести анализ годового хода изменения температур грунта вследствие экзогенных поступлений тепловой энергии.
3. Разработать грунтовый теплообменник и оптимизировать его параметры для нагрева (охлаждения) воздушного потока.

4. Разработать и оптимизировать новую конструкцию вентилируемого фасада для создания искусственной воздушной оболочки здания.

5. Провести экспериментально-теоретические исследования эффективности тонкопленочных фотоэлектрических преобразователей нового поколения для электроснабжения зданий.

6. Провести анализ энергетической, экономической и экологической эффективности комплексного энергоснабжения малоэтажного здания солнечной и геотермальной энергией.

**Объект исследования** – система использования возобновляемой энергии для создания тепловой оболочки вокруг здания с использованием новой системы вентилируемого фасада.

**Предметом исследования** является влияние работы систем на основе возобновляемых источников энергии на снижение затрат на отопление и вентиляцию в зданиях с искусственной воздушной оболочкой.

**Научную новизну работы** составляют:

- Впервые предложена и разработана система использования подогретого грунтовым теплообменником приточного воздуха для создания искусственной фасадной тепловой оболочки с целью снижения затрат на отопление зданий;

- Создана конструкция многослойной фасадной панели с вентилируемым зазором для использования в зданиях с комплексом возобновляемых источников энергии;

- Создана методика подбора оптимальных параметров панели для зданий с солнечно-геотермальным энергоснабжением;

- Проведены исследования эффективности применения солнечной фасадной электростанции;

- Проведен энергетический, экологический и экономический анализ системы использования геотермальной энергии для создания дополнительной тепловой оболочки вокруг здания с использованием новой системы вентилируемого фасада для применения в практике зеленого строительства.

**Практическая значимость работы.** Разработана принципиальная схема применения энергоустановки на основе солнечной и геотермальной энергии для зданий с эффективными фасадными панели с воздушным зазором.

Разработана методика определения параметров грунтового коллектора.

Разработана принципиальная схема работы инженерных систем для зданий с комплексом ВИЭ, основанная на солнечной и геотермальной энергии, как наиболее надежных и неисчерпаемых ресурсах.

Разработана параметрическая расчетная модель фрагмента фасада здания, с помощью которой можно решать следующие задачи:

- определять перемещения и напряжения в панелях с разными геометрическими параметрами;

- осуществлять подбор оптимальных параметров на основании разработанной методики для разных климатических условий;

- определять приведенное сопротивление теплопередаче панели.

**Методология и методы исследований.**

При выполнении работы использовались методы математического моделирования. Для реализации компьютерной модели грунтового коллектора и фрагмента фасада с воздушным вентилируемым зазором применялся программный комплекс ANSYS.

**Основные положения, выносимые на защиту.**

1. Система солнечно-геотермального энергоснабжения для зданий с эффективными фасадными конструкциями.

2. Параметрическая модель многослойной фасадной панели для зданий с солнечно-геотермальным энергоснабжением.

3. Методика определения оптимальных параметров панели для разных климатических условий.

4. Результаты компьютерного моделирования фрагмента грунтового воздушного коллектора.

5. Результаты экспериментального исследования свойств фотоэлектрических преобразователей на основе аморфного и монокристаллического кремния.

**Личный вклад автора.** Общее направление экспериментальных, расчетных и теоретических работ задавалось научным руководителем профессором, к.т.н., Алехиным В.Н. Совместно с сотрудниками кафедры «САПРОС» ИСА и кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии» УралЭНИН (УрФУ) автор участвовал в научных исследованиях. Автором лично:

1. Разработана система солнечно-геотермального энергоснабжения для зданий с эффективными фасадными конструкциями;
2. Разработана конструкция многослойной фасадной панели для зданий с солнечно-геотермальным энергоснабжением;
3. Разработана методика определения оптимальных параметров панели для разных климатических условий;
4. Проведены исследования эффективности применения солнечной фасадной электростанции;
5. Разработана методика определения параметров грунтового коллектора для подогрева приточного воздуха;
6. Проведен энергетический, экологический и экономический анализ системы использования геотермальной энергии для создания дополнительной тепловой оболочки вокруг здания с использованием новой системы вентилируемого фасада для применения в практике зеленого строительства.

**Обоснованность и достоверность** научных положений, выводов и результатов базируется на известных положениях и методах моделирования с применением ЭВМ, теплотехники и подтверждается результатами экспериментальных исследований и математического моделирования.

**Апробация работы.** Основные результаты исследований по теме диссертации были представлены на следующих форумах:

1. Международная научно-техническая конференция «International Conference on Industrial Engineering» («Пром-инжиниринг»), г. Челябинск, 2016 (личное участие с докладом).
2. Международная конференция «SPbWOSCE. Energy efficiency and Sustainable Development in Civil Engineering», г. Санкт-Петербург, 2017 (личное участие с докладом).
3. Международная конференция «SMART CITY», г. Генуя, Италия, 2018 (личное участие с докладом).
4. Международная конференция «International Conference on Energy Engineering and Smart Grids», г. Кэмбридж, Великобритания, 2018 (личное участие с докладом).
5. Круглый стол «Энергосберегающее домостроение: технологии строительства энергоэффективных зданий и каркасное домостроение», организованный Министерством строительства и развития инфраструктуры Свердловской области, г. Екатеринбург, 2018 (личное участие с докладом).
6. Международная конференция «International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety», г. Челябинск, 2018 (личное участие с докладом).
7. Международный форум высотного и уникального строительства «FORUM 100+», г. Екатеринбург, 2018 (личное участие с докладом).
8. Международный форум «UN HABITAT», организованный ООН (Организацией Объединенных наций) «Changing the world: Innovations and Better Life for Future Generations» («Изменяя мир: инновации и лучшая жизнь для будущих поколений»), г. Екатеринбург, 2019 (личное участие с докладом).

9. Круглый стол «Красивый город: архитектурная выразительность фасадов», организованный Министерством строительства и развития инфраструктуры Свердловской области, г. Екатеринбург, 2020 (личное участие с докладом).

10. Международная конференция «International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety», г. Сочи, 2020 (личное участие с докладом).

11. Международный форум «100+ Technobuild», г. Екатеринбург, 2020 (личное участие с докладом).

12. Круглый стол «Современные фасады: материалы, технологии, эстетика», организованный Министерством строительства и развития инфраструктуры Свердловской области, г. Екатеринбург, 2021 (личное участие с докладом).

**Публикации.** По теме работы опубликовано 13 работ, из них 6 статей опубликованы в зарубежных изданиях, входящих в международные базы цитирования Scopus и Web of Science; 5 статей опубликованы в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК РФ; 1 патент на полезную модель РФ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения, изложенных на 135 страницах машинописного текста, содержит 32 страниц приложений, 86 рисунков, 17 таблиц, список используемой литературы из 81 наименований.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи, научная новизна, практическая значимость, основные положения, выносимые на защиту. Обозначены объект и предмет исследования. Представлены сведения об апробации результатов и публикациях по теме исследования.

**В первой главе** рассмотрена актуальность проблемы энергосбережения и развития возобновляемой энергетики. Обсуждается потенциал солнечной и геотермальной энергетики в РФ, целесообразность использования стабильных и неисчерпаемых возобновляемых источников энергии для внедрения в здания и сооружения. Строительство, эксплуатация зданий и сооружений потребляют до половины всей выработанной энергии в мире. Эффективность ограждающих конструкций значительно влияет на энергосбережение зданий и формирует до 30% тепловых потерь. Использование возобновляемых источников энергии в зданиях эффективно при ограждающих конструкциях с высокими теплоизолирующими характеристиками.

Комплексный подход к внедрению в здания энергоустановок на основе возобновляемых источников энергии позволит значительно сократить энергопотребление и повысить их энергоэффективность. Огромным потенциалом для развития зданий с комплексом ВИЭ обладают территории Российской Федерации с децентрализованным энергоснабжением, характеризующиеся невысокой потребительской мощностью, отсутствием доступа к электросетям, нехваткой топлива, суровыми климатическими условиями, малой плотностью населения.

В обзоре исследований приведены отечественные и зарубежные решения по внедрению в ограждающие конструкции энергосистем, работающих на возобновляемых источниках энергии. В главе рассматриваются некоторые пассивные способы использования солнечной энергии в зданиях. К примеру, солнечная стена Феликса Тромба представляет собой массивную каменную конструкцию, установленную на южной стороне здания за фасадным остекленным ограждением. Стена может быть покрыта поглощающей фольгой или окрашена в черный цвет. Такое устройство стены позволяет накапливать солнечную энергию, а затем отдавать помещению тепловую энергию в ночное время. В концепции солнечного дома Дугласа Балкомба применен принцип обогрева жилых помещений с использованием двухсветной солнечной теплицы с южной стороны.

Шведскому архитектору Бенгт Варне принадлежит идея создания дома-теплицы, построенного внутри прозрачного футляра, выполненного из стекла или поликарбоната. Снижение

ветровой нагрузки и воздушный зазор между фасадами позволяет уменьшить температурный напор между помещениями и улицей.

Также приведены активные способы использования солнечной энергии, такие как фасадные и кровельные панели с установленными фотоэлектрическими преобразователями.

Отмечается большой вклад в развитие солнечной и геотермальной энергетики отечественных ученых: Д.С. Стребкова, В.А. Бутузова, В.В. Елистратова, С.В. Алексеенко, С.Е. Щеклеина, В.И. Велькина, Л.А. Безрукова, В.И. Зоркальцева, Н.П. Селиванова, А.Н. Сахарова, И.И. Анисимова, Е.В. Сарнацкого, А.Б. Алхасова. В своих работах Н.П. Селиванов и Е.В. Сарнацкий сформировали общие принципы проектирования энергоактивных зданий. Исследования на тему разработки энергоустановок на базе возобновляемых источников энергии представлены в диссертациях Е.В. Брянцева, П.П. Безруких, В.А. Бутузовым, А.И. Сидельниковым, А.В. Тихоновым, В.С. Афониним и Аунг Ко.

С.Н. Мартиросов разработал методику выбора параметров энергоустановок для автономного сельского дома, которая включает в себя описание необходимых мероприятий по сокращению энергозатрат здания на стадии проектирования, анализу местных природно-климатических факторов района строительства, выбору формы и ориентации здания на площадке с целью оптимизации энергетического баланса объекта. В диссертационной работе С.Н. Мартиросова подробно рассмотрена целесообразность использования систем на основе энергии солнца и ветра для электроснабжения маломощных автономных потребителей.

С.Е. Щеклеин и В.М. Пахалуев в своих работах и исследованиях приводят проект энергоавтономного жилого дома – «экодома». Функционирование «экодома» основано на следующих принципах: электроэнергия, выработанная ветрогенератором, частично идет потребителям и частично на водяной насос, подающий воду из скважины; органические отходы подаются в биореактор, биогаз из биореактора очищается и используется как топливо. Ледник обеспечивает в жаркое время систему кондиционирования. Солнечные коллекторы снабжают тепло аккумуляторы теплоты, а в холодное время года отдает накопленное тепло в систему отопления. В данной системе возможно использование теплового насоса.

Диссертационная работа М.И. Низовцева посвящена исследованию тепло- и массопереноса в энергоэффективных ограждающих конструкциях и климатическом оборудовании зданий. В работах М.И. Низовцева приведены экспериментально-теоретические исследования и их практическая реализация в области строительной теплофизики и теплообменного оборудования, методы решения инженерных задач энергосбережения и ресурсосбережения.

Также приведен краткий обзор существующих фасадных систем с воздушным вентилируемым зазором и легких металлических панелей. Поскольку вклад возобновляемой энергии нередко ограничен по различным причинам, здание должно иметь наименьшие потери энергии.

**Вторая глава** посвящена разработке новой концепции применения возобновляемых источников энергии в зданиях с целью повышения их энергетической эффективности. Одним из наиболее доступных источников низкопотенциальной тепловой энергии для теплохладоснабжения зданий является тепло грунта верхних слоев земли. Фактически грунт представляет собой тепловой аккумулятор неограниченной емкости, аккумулирующий энергию Солнца. Солнечная энергия, поглощенная земной поверхностью, формирует температурный режим слоя грунта до 20 метров, в зависимости от условий местности. Колебания температуры грунтового массива отстают во времени от колебаний температуры наружного воздуха, поэтому на определенной глубине максимальные температуры грунта могут наблюдаться в холодный период года. На рисунке 1 изображены графики изменения температуры грунта глубине 1,6 м и 3,2 метра в течение года для Екатеринбурга и Владивостока.

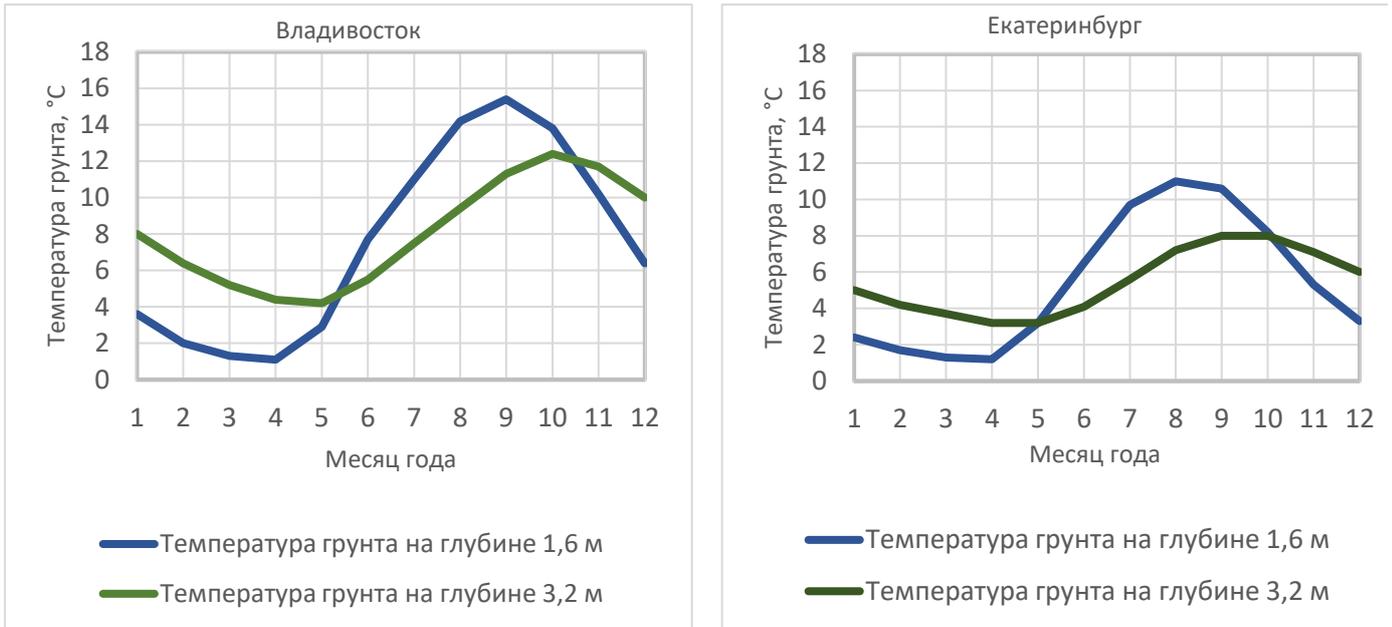


Рис. 1. График изменения температуры грунта на глубине 1,6 м, 3,2 м для Владивостока и Екатеринбурга

На рисунке 2 приведена карта потенциала накопленной солнечной энергии в верхнем слое грунта толщиной 1,6 метра. Количество теплоты, накопленное в одном кубическом метре толщи грунта определяется по формуле

$$Q / V = \rho \cdot C \cdot (T_{1,6 м}^{cp} - T^{5XC}) \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность грунта;

$C$  – удельная теплоемкость грунта;

$T_{1,6 м}^{cp}$  – среднегодовая температура грунта на глубине 1,6 метра;

$T^{5XC}$  – температура воздуха наиболее холодной пятидневки обеспеченностью 0,92.

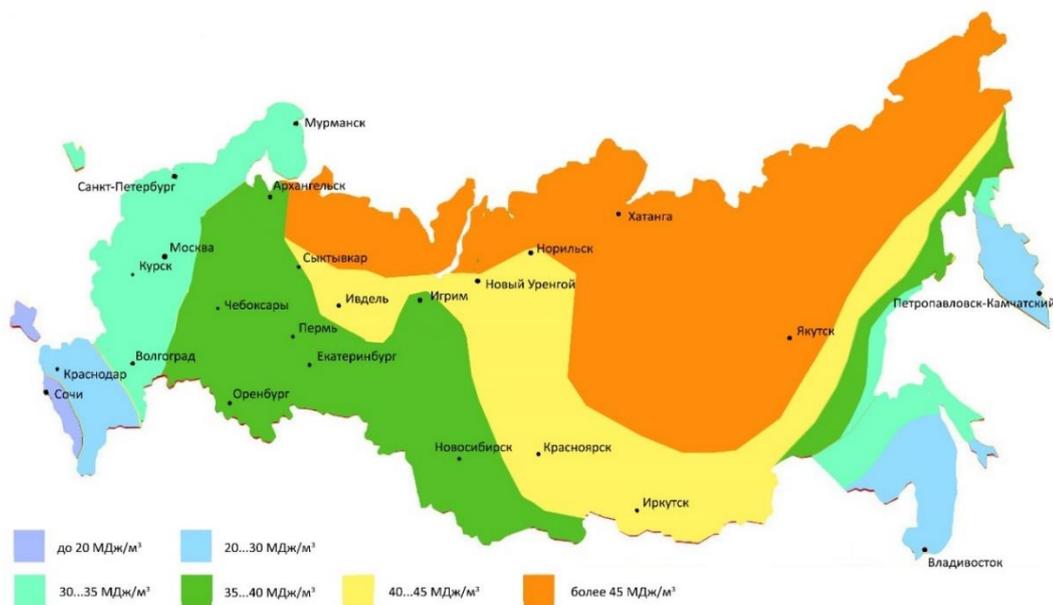


Рис. 2. Карта потенциала накопленной тепловой энергии в результате экзогенных процессов на территории РФ

Грунтовый коллектор представляет собой систему труб с циркулирующим по ним теплоносителем, осуществляющий отбор тепла от грунта и отвод к потребителю. Потребляемая энергия компенсируется тепlopоступлениями из окружающего массива, что позволяет использовать в качестве источника низкопотенциального тепла грунт. При использовании грунтового массива для хладоснабжения зданий в летний период, грунт охлаждает теплоноситель и повышает свою температуру. Накопленное тепло летом повышает температурный потенциал грунта к началу отопительного сезона.

Концепция заключается в создании стеновых ограждающих конструкций зданий, выполняющих теплoзащитную функцию и энергогенерирующую функцию за счет установленных с внешней стороны фасада солнечных панелей (рисунок 3). Фасадную систему предлагается выполнять из панелей с замкнутым воздушным вентилируемым зазором, в который подается теплый воздух, предварительно нагретый грунтовым теплообменником.

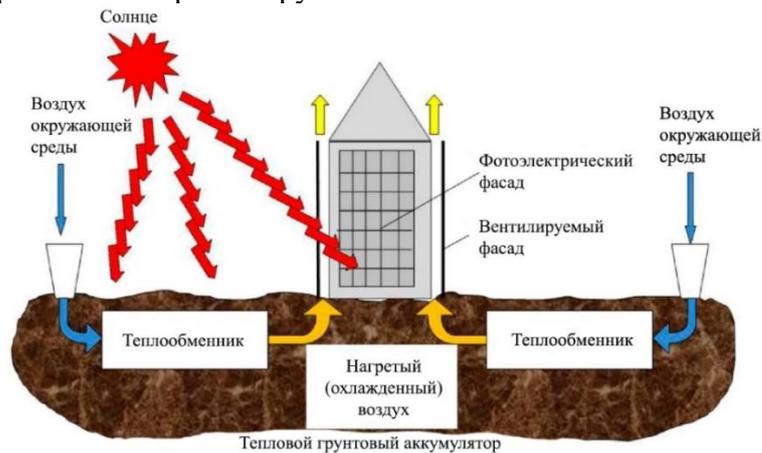


Рис. 3. Концепция применения возобновляемых источников энергии в зданиях с фасадными панелями с вентилируемым воздушным зазором

На рисунке 4 показана многослойная фасадная панель (МФП) послойно. МФП состоит из внутреннего (2) и внешнего (6) теплоизоляционных слоев, между которыми расположен каркас из перфорированных швеллеров (4). Внутренний слой панели состоит из каркаса из термопрофилей (10), облицованный цементными влагостойкими плитами (3) с двух сторон. Между цементными плитами (1,3) на стенки термопрофилей (10) уложена теплоизоляция (2). Цементные плиты крепятся к каркасу (10) с помощью саморезов. По четырем углам внутреннего слоя панели устанавливаются крепежные элементы (11). Крепежный элемент представляет собой коробчатый уголок с пазом, в который заводится опорный элемент, выполненный из двутавра. Крепежный элемент соединяет все внутренние слои панели между собой и соединяется с каркасом из термопрофилей с помощью саморезов. С южной стороны фасада предусмотрена возможность монтажа на внешний алюминиевый лист МФП фотоэлектрических преобразователей (9).

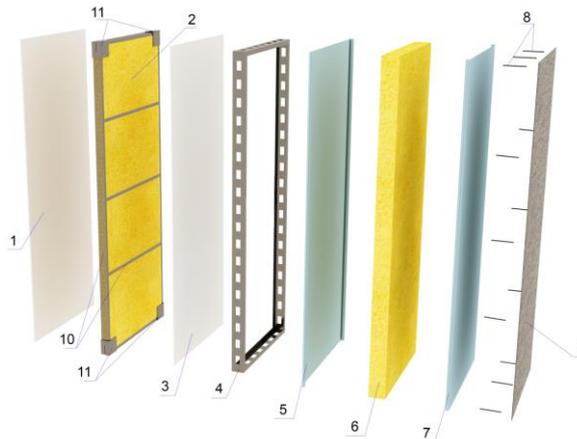


Рис. 4. Конструкция МФП с указанием слоев и элементов

Для эффективной работы МФП может быть использован грунтовый теплообменник. На рисунке 5 показана схема, как наружный холодный воздух поступает в грунтовый теплообменник, затем поступает в приточно-вытяжную установку, где происходит догрев, и оттуда поступает в помещения. Отработанный вытяжной воздух сначала проходит через рекуператор, затем через конденсационный осушитель, после чего поступает в нижней части вентилируемого воздушного зазора фасада. Теплый воздух в зазоре панелей поднимается вверх, где происходит удаление вытяжного воздуха через вентиляционные решетки в уровне парапета здания.

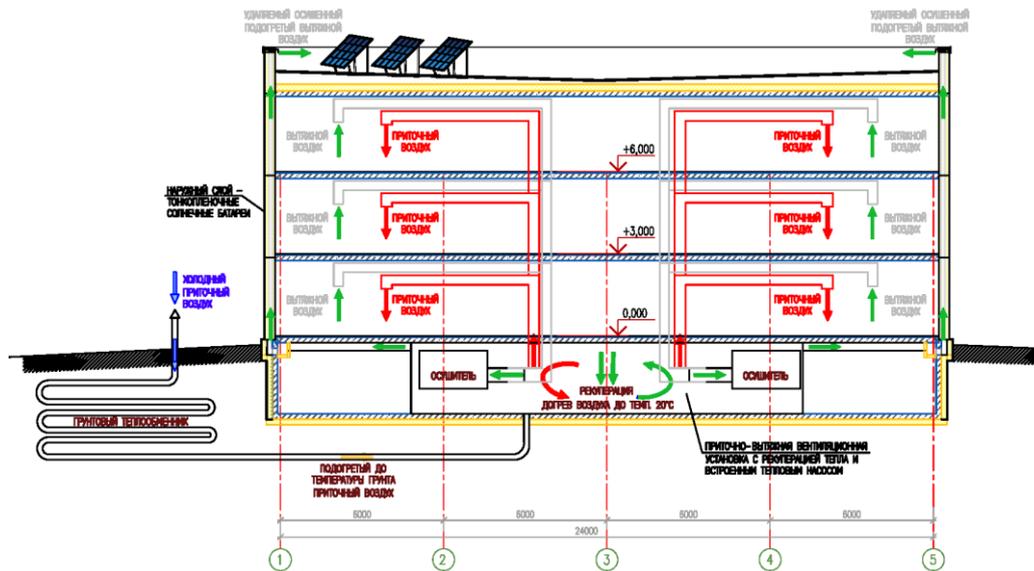


Рис. 5. Схема эффективной работы МФП с использованием грунтового теплообменника и фотоэлектрических преобразователей на южном фасаде

В летний период приточный воздух, охлажденный за счет использования грунтового теплообменника до температуры грунта, подается в воздушный зазор фасада, вследствие чего уменьшается требуемая мощность системы кондиционирования.

Такие схемы работы образуют собой замкнутый цикл движения воздушных масс, в результате которого весь объем нагретого воздуха для систем принудительной вентиляции направлен на сохранение положительной температуры в вентилируемом зазоре. Подача нагретого осушенного воздуха происходит через распределительный П-образный лоток, который расположен под панелью 1-го этажа в уровне плиты перекрытия между подвалом и первым этажом (рисунок б). В лотке организованы входные отверстия, к которым подведены трубы от осушителя воздуха. Выброс воздуха происходит через специальное отверстие в верхней части парапетной панели, отверстие защищено фартуком от попадания влаги (рисунок б).

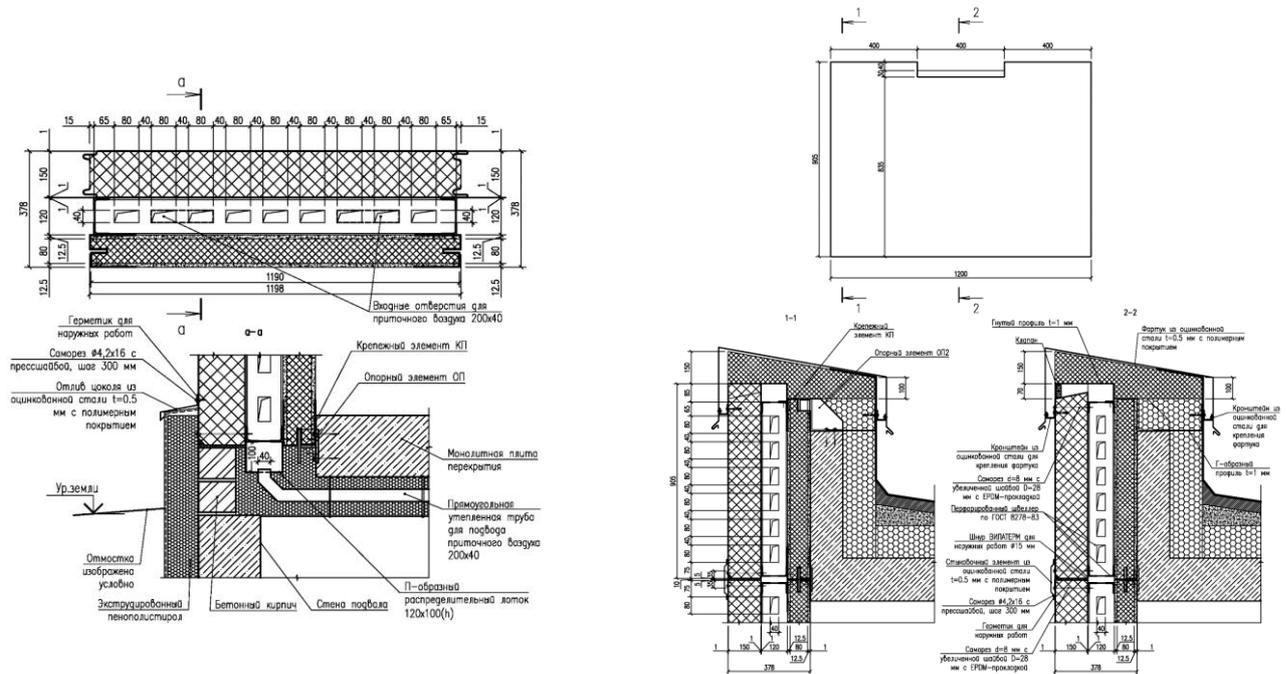


Рис. 6. План отверстий в распределительном лотке МФП.

Узел примыкания лотка, воздуховода к МФП (слева). Парпетная панель с утепленным клапаном для удаления вытяжного воздуха (справа)

В третьей главе приведены результаты исследования установленной на южный фасад сетевой солнечной электростанции на примере трехэтажного жилого дома. Для реализации эффективной работы МФП требуется дополнительный расход энергии на оборудование, получить которую возможно частично за счет фасадной солнечной электростанции. Использование солнечного фасада позволяет снизить затраты электроэнергии на отопление и вентиляцию более чем на 10%. На южном фасаде на каждой МФП можно разместить 6 фотоэлектрических преобразователей мощностью 100 Вт с эффективностью 20% (18 В, 5,56 А). Панели соединены последовательно по 18 штук, образуя 9 групп, соединенных между собой параллельно. Пиковая мощность солнечной станции составляет 16,21 кВт. Схема соединения изображена на рисунке 7.

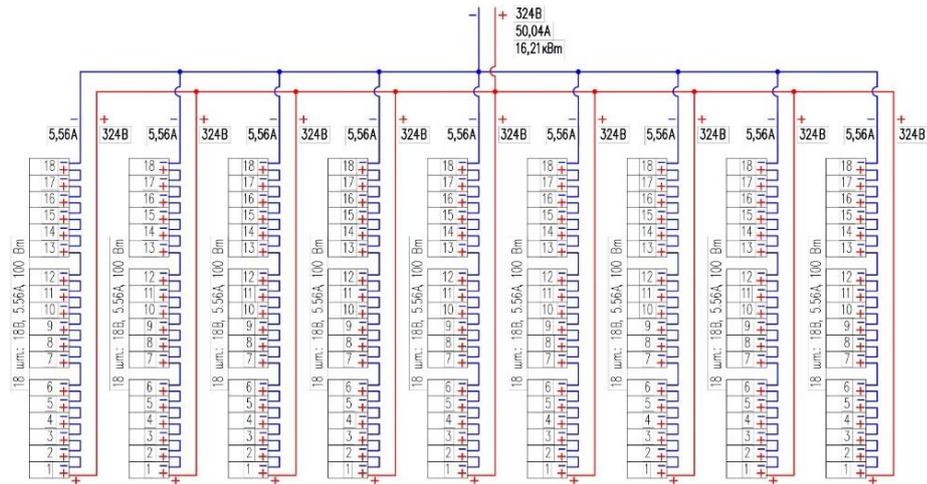


Рис. 7. Схема соединения солнечных панелей

Солнечная фасадная электростанция соединяется с городской сетью через сетевой герметичный трехфазный инвертор с встроенными МРРТ-контроллерами. В таблице 1 приведены выработки электроэнергии солнечными панелями для двух городов. При площади панелей, установленных на южный фасад здания, равной  $97,2 \text{ м}^2$ , выработка энергии принятыми панелями с КПД 20% для Свердловской области составляет около 38% от суммарного годового потребления

электроэнергии проживающих без учета потребления электроэнергии на общедомовые нужды. Для республики Крым выработка энергии панелями составляет около 94% от общего потребления жителями.

Таблица 1

Выработка электроэнергии солнечными панелями с разными КПД

	Екатеринбург	Севастополь	Отношение энергии, выработанной ФЭП к энергопотреблению (%)	
Годовая суммарная солнечная радиация Q, кВт·ч/м <sup>2</sup>	657,47	1 479,19		
Величина годовой суммарной радиации, поступающей на фасад, кВт·ч	63 906,08	143 777,27	Екатеринбург	Севастополь
Выработка энергии ФЭП (с КПД 20%), кВт·ч	12 781,20	28 755,40	38,88	94,75

В летний период 2020 года были проведены экспериментальные исследования энергетических характеристик фотоэлектрических преобразователей на основе аморфного и монокристаллического кремния мощностью 144 Вт и 150 Вт, соответственно. Моделирование электрических нагрузок проводилось на постоянном токе, в диапазоне мощностей электрическими лампами (имитаторами нагрузки) в диапазоне от 5 до 100 Вт. Исследование ФЭП производилось на территории Свердловской области в 20 км от города Екатеринбурга.

Паспортный КПД панелей составляет 13%. В течение всего дня производились замеры тока короткого замыкания  $I_{кз}$  и напряжение холостого хода  $U_{xx}$  для двух типов ФЭП. В ходе эксперимента были получены предельные значения коэффициентов полезного действия для ФЭП на основе аморфного и монокристаллического кремния. Коэффициенты полезного действия для разных ФЭП определяются как отношение выработанной энергии к поступившей на их поверхность солнечной радиации (рисунок 8).

$$\eta_{аморфн} = \frac{U_{xx} J_{кз}}{S_{аморфн} Q} \cdot 100\% = \frac{172,679}{1,95 \cdot 753,447} \cdot 100\% = 11,75\% \quad (2)$$

$$\eta_{монокр} = \frac{U_{xx} J_{кз}}{S_{монокр} Q} \cdot 100\% = \frac{183,073}{2,16 \cdot 753,447} \cdot 100\% = 11,25\% \quad (3)$$

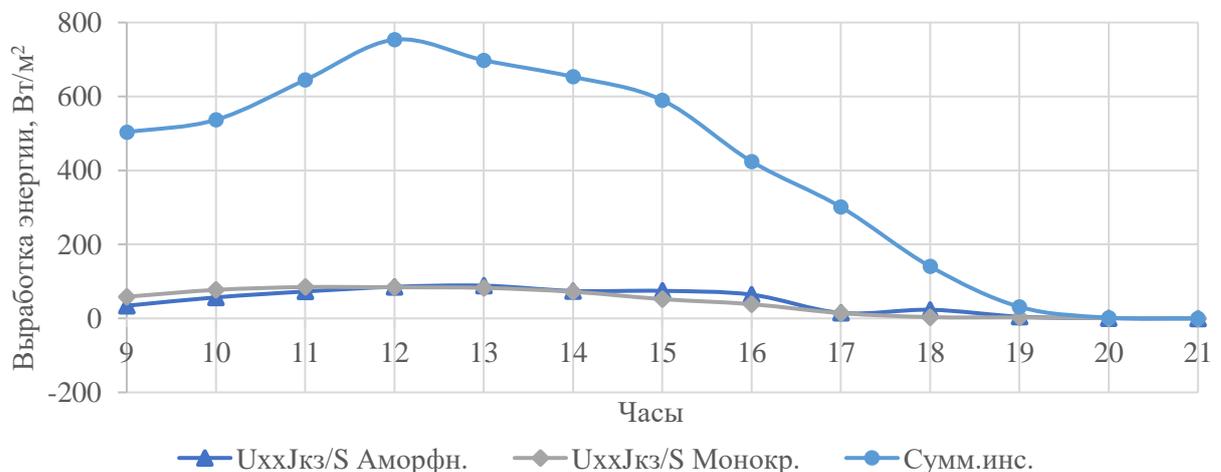


Рис. 8. Выработка энергии ФЭП на основе аморфного и монокристаллического кремния

Экспериментальные установки позволили проанализировать и сравнить ток короткого замыкания и напряжение холостого хода для разных ФЭП при изменении угла наклона к горизонту. На рисунке 9 показаны кривые зависимости  $I_{кз} \times U_{хх}$  от положения панелей. По полученным данным можно сделать вывод, что при изменении угла наклона для обоих ФЭП  $I_{кз} \times U_{хх}$  меняется практически одинаково:

- для аморфной панели  $\frac{(U_{хх} J_{кз})_{\min}}{(U_{хх} J_{кз})_{\max}} = 0,57$ ,
- для монокристаллической  $\frac{(U_{хх} J_{кз})_{\min}}{(U_{хх} J_{кз})_{\max}} = 0,56$ .

Проведенный анализ энергетического потенциала солнечного фасада позволяет оценивать эффективность использования ФЭП на вертикальных поверхностях для регионов с разной годовой суммарной солнечной радиацией. Полученные экспериментальные зависимости КПД ФЭП на основе аморфного и монокристаллического кремния от угла наклона к горизонту позволяют оценить снижение эффективности при установке на вертикальных поверхностях.

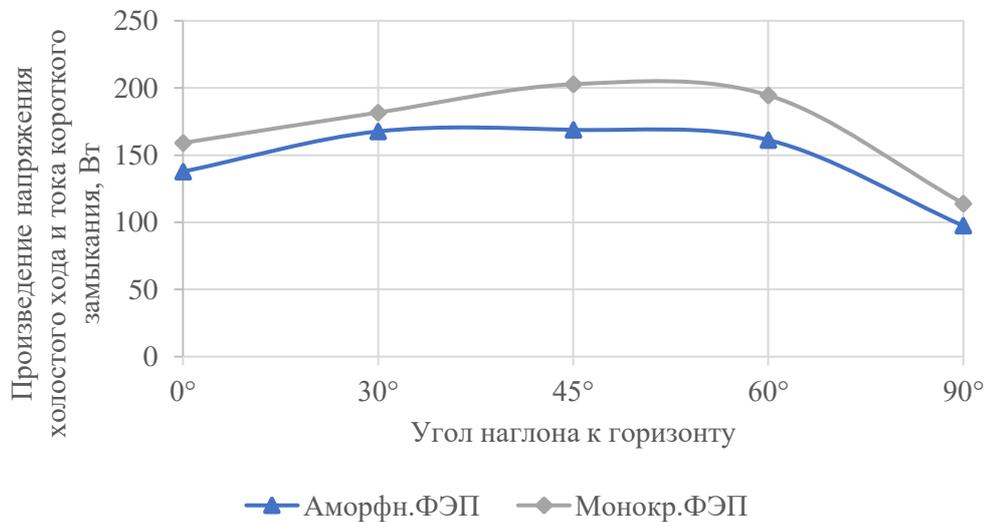


Рис. 9. График зависимости произведения напряжения  $U_{хх}$  и тока короткого замыкания  $I_{кз}$  разных ФЭП от угла наклона к горизонту

**Четвертая глава** посвящена исследованию прочностных и теплотехнических характеристик многослойной фасадной панели для зданий с комплексом возобновляемых источников энергии.

Расчет прочности МФП выполнялся в программном комплексе ANSYS.

Расчет конструкции МФП по предельным состояниям 1-й и 2-ой группы выполнялся с учетом неблагоприятных сочетаний нагрузок. Для навесных фасадных систем учитывались пиковые положительные и отрицательные воздействия ветровой нагрузки. Также дополнительно задавалась возможная горизонтальная нагрузка на панель со стороны помещения.

Формула для определения основных сочетаний нагрузок, состоящих из постоянных, длительных и кратковременных, имеет вид

$$S_m = P_d + (\psi_{11} P_{11} + \psi_{12} P_{12} + \dots) + (\psi_{21} P_{21} + \psi_{22} P_{22} + \dots), \quad (4)$$

где  $P_d$  – постоянная нагрузка,

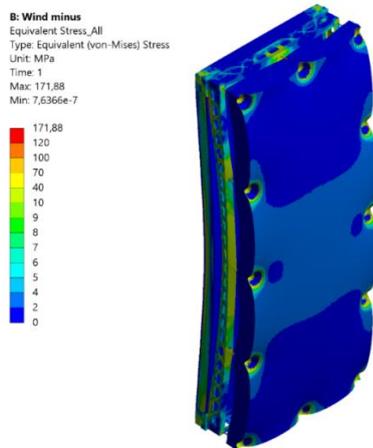
$P_l$  – длительные нагрузки,

$P_t$  – кратковременные нагрузки.

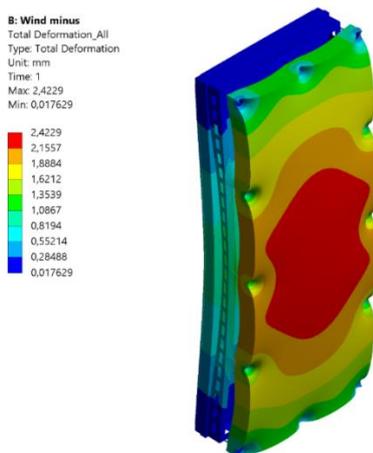
$\psi_l, \psi_t$  – коэффициенты сочетаний для нагрузок.

Максимальные напряжения в панели получены при отрицательном давлении ветра. На рисунке 10 представлено распределение напряжений панели для данного расчетного случая.

Прогибы панели не превосходили предельных деформаций при значениях расчетных нагрузок с учетом коэффициента надежности по нагрузке  $\gamma_f$  (рисунок 11).



*Рис. 10. Распределение напряжений в МФП при пиковых отрицательных воздействиях ветровой нагрузки*



*Рис. 11. Деформации в МФП при пиковых отрицательных воздействиях ветровой нагрузки*

В диссертации теплотехнический расчет и подбор оптимальных параметров МФП выполнялись в программном комплексе ANSYS. Апробация методики проводилась на примере трехэтажного жилого здания, расположенного в Екатеринбурге. Для расчета был выбран фрагмент стены без окон. Расчетная модель, выполненная в SOLIDWORKS, состоит из трех панелей для трех этажей, парапетной панели, распределительного лотка в подвале, предназначенного для подачи нагретого воздуха в вентилируемый зазор панели. В ANSYS Fluent на граничных поверхностях задаются входные параметры модели (рисунок 12):

- скорость потока (ветра) –  $V_{wind}$  (м/с) и температура внешней среды  $T_{outside}$  (К);
- значения массового расхода  $Qm_{inlet\_fl}$  (кг/с) и температуры приточного воздуха  $T_{inlet\_fl}$  (К) в помещениях каждого этажа;
- значения массового расхода  $Qm_{inlet\_bs}$  (кг/с) и температуры воздуха на входе  $T_{inlet\_bs}$  (К) в зазор панели;
- значения температуры воздуха в подвале  $T_{bs\_average}$  (К);
- клапан в парапетной панели для выхода воздуха.

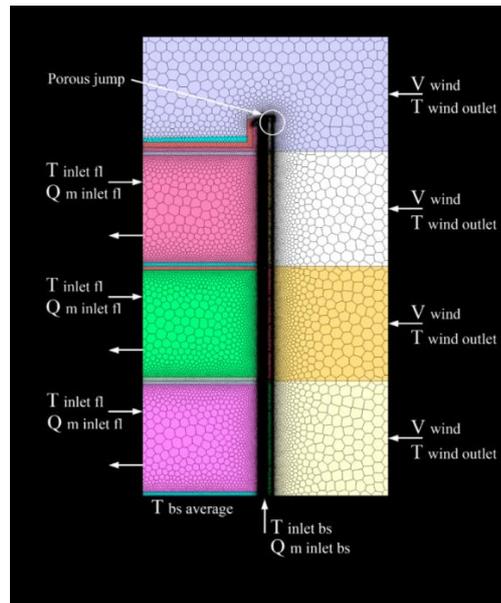


Рис. 12. Граничные условия расчетной модели

Расчет в первом приближении проводился при температуре наружного воздуха, равной средней температуре наиболее холодного месяца, при одинаковой температуре и кратности приточного воздуха. При подборе оптимальных геометрических параметров многослойной фасадной панели приняты следующие условия:

- общая толщина панели не должна превышать 400 мм;
- разница температур внутренней поверхности стенки и воздуха в помещении должна составлять не более 4°C;
- температура элементов вентилируемого зазора должна быть выше точки росы обтекающего их воздуха.

Для выбора оптимальных параметров МФП применена теория планирования факторного эксперимента. Целью оптимизационной процедуры является определение набора параметров, при которых приведенное сопротивление теплопередаче примет максимальное значение с одновременным выполнением вышеописанных условий

$$\begin{cases} R_{мфп} = f(X_1, X_2, X_3) \rightarrow \max, \\ (t_{inlet\_fl} - t_{wall\_s1\_min}) \leq \Delta t^H, \\ t_{wall\_s3\_min} \geq t_p, \\ t_{wall\_s4\_min} \geq t_p, \\ t_{wall\_s5\_min} \geq t_p, \end{cases} \quad (5)$$

где  $R_{мфп}$  - приведенное сопротивление теплопередаче;

$X_1$  - толщина внешнего слоя теплоизоляции;

$X_2$  - величина вентилируемого зазора;

$X_3$  - толщина внутреннего слоя теплоизоляции;

$t_{inlet\_fl}$  - температура воздуха в помещении;

$t_{wall\_s1\_min}$  - минимальная температура внутренней стенки панели;

$t_{wall\_s3\_min}$  - минимальная температура стенки аквапанели со стороны вентилируемого зазора панели;

$t_{wall\_s4\_min}$  - минимальная температура несущего швеллера;

$t_{wall\_s5\_min}$  - минимальная температура алюминиевого листа со стороны вентилируемого зазора панели;

$t_p$  - точка росы.

В соответствии с действующими нормами был произведен предварительный анализ возможных толщин теплоизоляционных слоев, полученные данные приняты как априорные. При планировании эксперимента в качестве факторов выбраны величины  $X_1, X_2, X_3$ . Всего рассчитывалось 27 вариантов сочетаний  $X_1, X_2, X_3$  с ограничением до 1200 итераций. В первом этапе эксперимента определены обобщающие показатели  $Y$  на основании преобразованных частных откликов

$$y_1 = \begin{cases} 1, & \text{если } (t_{inlet\_fl} - t_{wall\_s1\_min}) \leq \Delta t^H, \\ 0, & \text{если } (t_{inlet\_fl} - t_{wall\_s1\_min}) > \Delta t^H, \end{cases}$$

$$y_2 = \begin{cases} 1, & \text{если } t_{wall\_s3\_min} \geq t_p, \\ 0, & \text{если } t_{wall\_s3\_min} < t_p, \end{cases}$$

$$y_3 = \begin{cases} 1, & \text{если } t_{wall\_s4\_min} \geq t_p, \\ 0, & \text{если } t_{wall\_s4\_min} < t_p, \end{cases}$$

$$y_4 = \begin{cases} 1, & \text{если } t_{wall\_s5\_min} \geq t_p, \\ 0, & \text{если } t_{wall\_s5\_min} < t_p. \end{cases} \quad (6)$$

Обобщающий показатель  $Y$  определяется

$$Y = \sqrt[4]{y_1 y_2 y_3 y_4}. \quad (7)$$

Согласно плану эксперимента были проведены расчеты для 27 расчетных случаев. В первом этапе эксперимента для всех вариантов рассматривалось выполнение всех условий, кроме расчета приведенного сопротивления теплопередаче панели. Результаты обобщенных откликов показали, что только для шести опытов выполнены условия по нормируемому перепаду между температурами внутренней стенки и воздуха в помещении.

Целью второго этапа теплотехнических расчетов является определение геометрических параметров МФП, соответствующих наибольшему расчетному значению приведенного сопротивления теплопередаче панели. Выбранные на первом этапе расчетов 6 вариантов сочетания геометрических параметров МФП повторно рассчитываются при тех же внешних условиях с расширенным набором контролируемых параметров, необходимых для определения расчетного сопротивления теплопередаче панели, и увеличенным до 2000 числом итераций.

Приведенное сопротивление теплопередаче МФП определяется для каждого этажа по формуле

$$R_{мфп}^i = \frac{T_{wall\_s1}^{ave\ i} - T_{wall\_s7}^{ave\ i}}{q^i}, \quad (8)$$

где  $T_{wall\_s1}^{ave\ i}$  - средняя температура стенки внутренней поверхности МФП;

$T_{wall\_s7}^{ave\ i}$  - средняя температура стенки наружной поверхности МФП

$q^i$  - плотность теплового потока через панель МФП определяется по формуле

$$q^i = q_{35}^i + q_{13}^i. \quad (9)$$

Плотность теплового потока в зазоре  $q^i$  определяется по формуле

$$q_{35}^i = \frac{Q_{35}^i}{S_{35}^i}, \quad (10)$$

где  $Q^i$  - тепловой поток в зазоре;

$S^i$  - площадь теплообмена в зазоре МФП.

Плотность теплового потока в направлении из помещения в зазор  $q_{13}^i$  определяем по формуле

$$q_{13}^i = \frac{T_{wall\_s1}^{ave\ i} - T_{wall\_s3}^{ave\ i}}{R_{13}^i}, \quad (11)$$

где  $T_{wall\_s1}^{ave\ i}$  - средняя температура стенки внутренней поверхности МФП;

$T_{wall\_s3}^{ave\ i}$  - средняя температура стенки в зазоре со стороны помещения;

$R_{13}^i$  - приведенное сопротивление теплопередаче внутреннего слоя панели МФП.

Тепловой поток в зазоре определяется по формуле

$$Q_{35}^i = Q_m \cdot C \cdot \Delta T, \quad (12)$$

где  $Q_m$  - массовый расход воздуха в зазоре;

$C$  - теплоемкость воздуха;

$\Delta T$  - тепловой напор по воздуху, равный разнице температур воздуха на входе и выходе из зазора МФП.

Общее значение приведенного сопротивления теплопередаче МФП для трехэтажного фрагмента модели определяется по формуле

$$R_{mfn} = \frac{\sum_{i=1}^n R_{mfn}^i}{n}, \quad (13)$$

где  $R_{mfn}^i$  - приведенное сопротивление теплопередаче МФП  $i$ -го этажа;

$n$  - количество этажей.

На втором этапе были определены оптимальные геометрические параметры, максимальное значение приведенного сопротивления теплопередаче получено при общей толщине МФП равной 357 мм, полученные оптимальные параметры  $X_1, X_2, X_3$  равны 150 мм, 100 мм, 80 мм, соответственно.

Целью третьего этапа теплотехнических расчетов является определение приведенного сопротивления теплопередаче для выбранного на втором этапе оптимального варианта геометрии МФП при разных значениях внешних условий. Каждый расчетный случай ограничен 2000 итераций. Расчеты производились для летнего и зимнего периодов, для разной кратности воздухообмена в здании, а также с учетом конструкции «теплого пола». По результатам анализа определено, что при температуре наружного воздуха ниже минус 18 °С следует предусматривать дополнительные мероприятия с целью обеспечения выполнения этих требований. К примеру, при однократном воздухообмене и температуре наружного воздуха минус 32 °С достаточно установки «теплого пола» удельной мощностью не менее 70 Вт/м<sup>2</sup>.

На рисунке 13 представлен график зависимости общего сопротивления теплопередаче МФП и теплового потока в зазоре от наружной температуры.

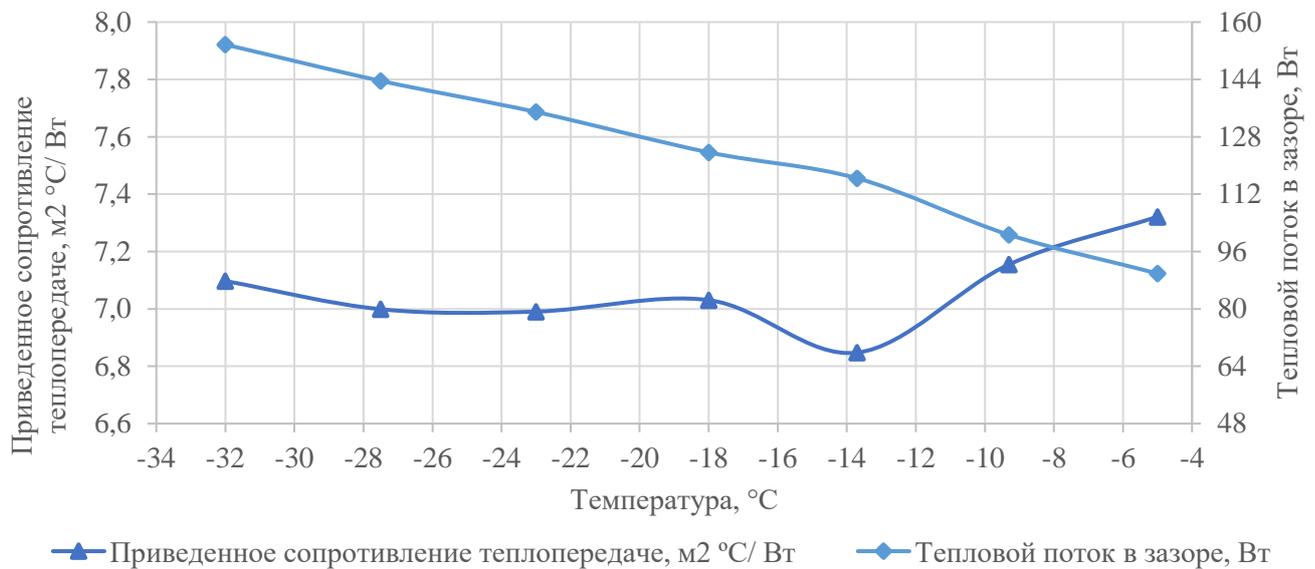


Рис. 13. График зависимости общего сопротивления теплопередаче МФП и теплового потока в зазоре от наружной температуры воздуха

**Пятая глава** посвящена анализу эффективности применения МФП в зданиях с солнечно-геотермальным теплоснабжением. Проанализировано три варианта исполнения жилого дома в городе Екатеринбурге:

- здание с МФП, грунтовым коллектором, тепловым насосом (вариант 1);
- здание с МФП, грунтовым коллектором, тепловым насосом и установленной на южный фасад СЭС (вариант 2);
- здание с традиционным вентилируемым фасадом, системой отопления, приточно-вытяжной системой вентиляции с рекуперацией тепла (вариант 3).

Для предварительного подогрева приточного воздуха в вариантах 1 и 2 используется грунтовой коллектор, установленный на глубине 3-х метров. Параметры теплообменника рассчитывались для нагрева приточного воздуха при температуре улицы от минус 18 °C до 0 °C. В отопительный период грунтовой теплообменник используется только при отрицательных температурах окружающей среды.

В программном комплексе ANSYS был смоделирован фрагмент полиэтиленовой трубы с массивом грунта. Расчетная модель представлена на рисунке 14. В расчете принят влагонасыщенный суглинок с плотностью 1600 кг/м<sup>3</sup> и удельной теплоемкостью 1000 Дж/(кг·K). Толщина стенки полиэтиленовой трубы принята равной 9,8 мм для всех вариантов наружных диаметров.

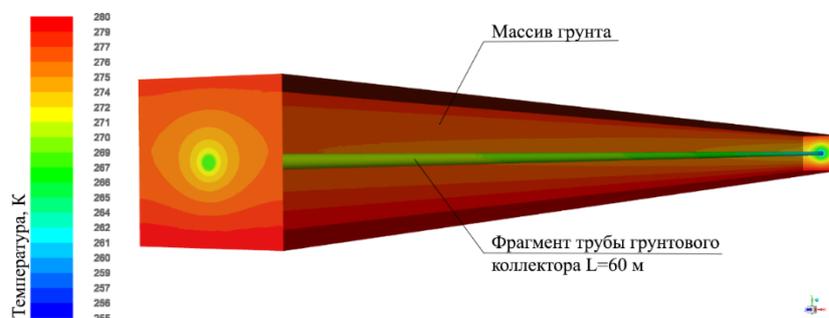


Рис. 14. Расчетная модель грунтового коллектора в программном комплексе ANSYS

Для окружающего грунта заданы температуры верхнего и нижнего слоя, равные 5 °C и 7 °C соответственно. На входе в трубу коллектора задана скорость воздуха с температурой минус 18 °C. Скорость воздуха зависит от диаметра трубы и количества параллельных труб коллектора.

Массовый расход воздуха через трубу коллектора определяется по формуле

$$Q_m^{TP} = \frac{Q \cdot \rho_{\text{возд}}}{3600 \cdot n_{TP}}, \quad (14)$$

где  $\rho_{\text{возд}}$  – плотность воздуха, входящего в трубу;

$n_{TP}$  – количество параллельных труб грунтового коллектора;

$Q$  – объемный расход.

Удельный теплосъем с погонного метра трубы коллектора определяется по формуле

$$q = \frac{Q_m^{TP} \cdot C_{\text{возд}} \cdot (T_{\text{возд}}^{\text{выход}} - T_{\text{возд}}^{\text{вход}})}{L}, \quad (15)$$

где  $C_{\text{возд}}$  – удельная теплоемкость воздуха, входящего в трубу;

$T_{\text{возд}}^{\text{выход}}$  – температура воздуха на выходе из грунтового коллектора;

$T_{\text{возд}}^{\text{вход}}$  – температура воздуха на входе в грунтовый коллектор;

$L$  – длина трубы коллектора.

Скорость потока воздуха в трубе коллектора определяется по формуле

$$V^{TP} = \frac{4Q}{3600 \cdot 3,14 \cdot (D - 2t)^2 \cdot n_{TP}}, \quad (16)$$

где  $D$  – наружный диаметр трубы коллектора;

$t$  – толщина стенки трубы.

Были проанализированы три варианта диаметров труб коллектора при разных значениях скоростей тока воздуха. Результаты расчетов по определению требуемых параметров грунтового коллектора представлены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты расчетов по определению требуемых параметров грунтового коллектора

№ опыта	$D$ , мм	$n_{TP}$ , шт.	$Q_m^{TP}$ , кг/с	$V^{TP}$ , м/с	$T_{\text{возд}}^{\text{выход}}$ , К	$T_{\text{возд}}^{\text{вход}}$ , К	$\Delta T$ , К	$q$ , Вт/п.м
1	0,4	3	0,44	2,77	255	262,29	7,29	54
2	0,4	6	0,22	1,39	255	265,86	10,86	40
3	0,4	9	0,15	0,92	255	268,35	13,35	33
4	0,4	12	0,11	0,69	255	270,49	15,49	28
5	0,4	16	0,08	0,52	255	272,65	17,65	24
<b>6</b>	<b>0,4</b>	<b>18</b>	<b>0,07</b>	<b>0,46</b>	<b>255</b>	<b>273,68</b>	<b>18,68</b>	<b>23</b>
7	0,28	10	0,13	1,78	255	269,45	14,45	32
8	0,28	14	0,09	1,27	255	271,75	16,75	26
9	0,28	16	0,08	1,11	255	272,58	17,58	24
10	0,28	20	0,07	0,89	255	273,77	18,77	21
11	0,225	6	0,22	4,76	255	265,91	10,91	40
12	0,225	9	0,15	3,17	255	268,61	13,61	33
13	0,225	10	0,13	2,85	255	268,59	13,59	30
14	0,225	12	0,11	2,38	255	268,88	13,88	25
15	0,225	14	0,09	2,04	255	269,71	14,71	23
16	0,225	18	0,07	1,59	255	271,53	16,53	20
17	0,225	22	0,06	1,30	255	272,64	17,64	18
18	0,225	26	0,05	1,10	255	276,4	21,4	18

Результаты расчетов показали, что при снижении скорости потока в трубе увеличивается разница температур воздуха на входе и выходе и снижается удельный теплосъем. Снижение количества параллельных труб коллектора напрямую приводит к сокращению объема земляных работ по устройству котлована. Минимальное количество параллельных ветвей коллектора достигается при применении труб с наружным диаметром 400 мм (опыт №6).

Использование грунтового коллектора позволяет снизить затраты электроэнергии на подогрев приточного воздуха на 40% (88548 кВт·ч) за отопительный период.

В вариантах 1 и 2 для определения расхода электрической энергии здания на отопление и вентиляцию за отопительный период была проанализирована работа оборудования при разных температурах. При температурах ниже минус 18 °С для догрева приточного воздуха после грунтового коллектора используется электрический нагреватель. Результаты теплотехнического расчета МФП показали, что использование теплого пола требуется при температурах наружного воздуха ниже минус 18 °С. Расчетная мощность теплого пола при температуре уличного воздуха минус 32 °С составляет 75 Вт/м<sup>2</sup>. Для обеспечения механической вентиляции здания и вентилируемого зазора фасадных панелей используются две вентиляторные установки высокого давления, подобранные с учетом суммарного аэродинамического сопротивления элементов системы. С целью снижения энергозатрат на нагрев приточного воздуха используется тепловой насос с тепловой мощностью 27,6 кВт и коэффициентом преобразования 4,6. Для работы насоса необходимо устройство 14-ти скважин для геотермальных зондов глубиной 60 м. Вытяжной воздух из помещений перед подачей в вентилируемый зазор фасадных панелей проходит через канальный конденсационный осушитель.

Схема работы оборудования для вариантов 1 и 2 представлена на рисунке 15.

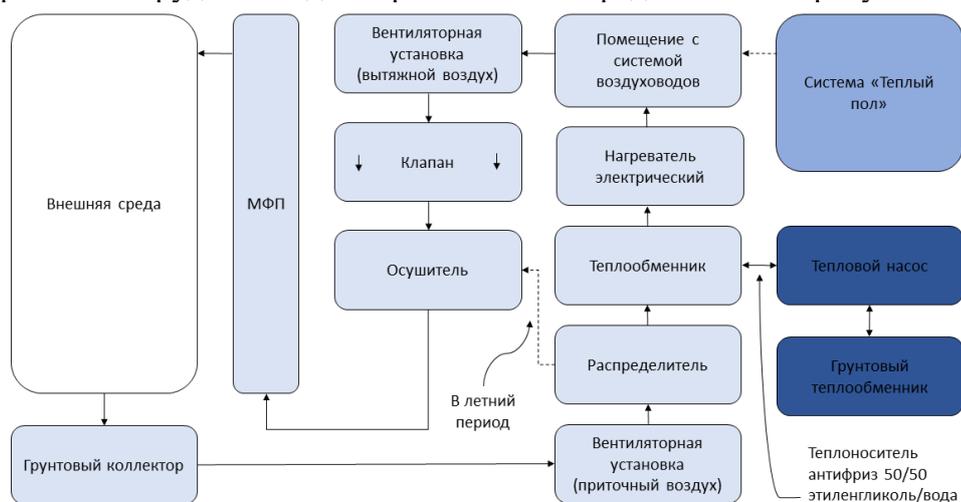


Рис. 15. Схема работы инженерного оборудования

Вариант 2 аналогичен первому; дополнительно добавлена фасадная солнечная сетевая электростанция общей максимальной мощностью 16,2 кВт. Солнечная электростанция функционирует без аккумуляторов.

В варианте 3 стеновые ограждающие конструкции здания выполнены из кирпичной кладки с утеплением и облицовкой алюминиевыми кассетами, предусмотрено подключение к централизованным тепловым сетям. Дополнительно здание оборудовано механической системой вентиляции с рекуперацией тепла и эффективным теплообменником.

Энергетический сравнительный анализ показал, что в варианте 1 затраты энергии на отопление и вентиляцию снижаются более чем на 30% (73 871 кВт·ч) относительно традиционного варианта 3 за отопительный период. Использование варианта 2 с позволяет снизить энергопотребление на 40% (86652 кВт·ч) относительно варианта 3.

Экологический анализ показывает снижение выбросов парниковых газов при применении МФП, теплового насоса, грунтового теплообменника, фасадной солнечной электростанции

относительно традиционного варианта на 40%, что составляет около 16 тонн диоксида углерода за отопительный период. Объем сжигаемого природного газа сокращается на 12 800 м<sup>3</sup> (40%) для анализируемого случая. Диаграмма потребляемой энергии и выбросов парниковых газов для анализируемых вариантов представлена на рисунке 16.



Рис. 16. Диаграмма потребляемой энергии и количества выбросов парниковых газов за отопительный период для трех вариантов исполнения зданий

Для экономической оценки рассматриваемых вариантов использован метод чистого приведенного дохода NPV (Net Present Value). Срок окупаемости рассчитывается для трех вариантов с одинаковым сроком эксплуатации – 25 лет. Выбранный период обусловлен заявленным сроком службы минераловатной теплоизоляции. Экономический эффект определяется с учетом разницы первоначальных капитальных затрат и разницы ежегодных эксплуатационных затрат с учетом дисконтирования. Первоначальные капитальные затраты  $CF_0$  приняты как разница исходных инвестиций для сравниваемых вариантов.

Чистый приведенный доход рассчитывается по формуле

$$NPV = CF_0 + \frac{CF_1}{(1+r)^1} + \frac{CF_2}{(1+r)^2} + \dots + \frac{CF_n}{(1+r)^n} = \sum_{t=0}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t}, \quad (17)$$

где  $CF_i$  – чистый денежный поток,  $i = 0, 1, \dots, t$ ;

$r$  – ставка дисконтирования; принята равной 4%, как прогнозируемый ежегодный рост стоимости тарифов на электрическую и тепловую энергию.

Результаты расчетов сроков окупаемости приведены на рисунке 17. Наиболее экономически эффективным вариантом в климатических условиях города Екатеринбурга является здание с МФП с сетевой СЭС при условии, что продажа выработанной энергии осуществляется по двухставочному тарифу. Полученные результаты подтверждают экономическую целесообразность применения системы возобновляемого энергоснабжения зданий с искусственной воздушной оболочкой.

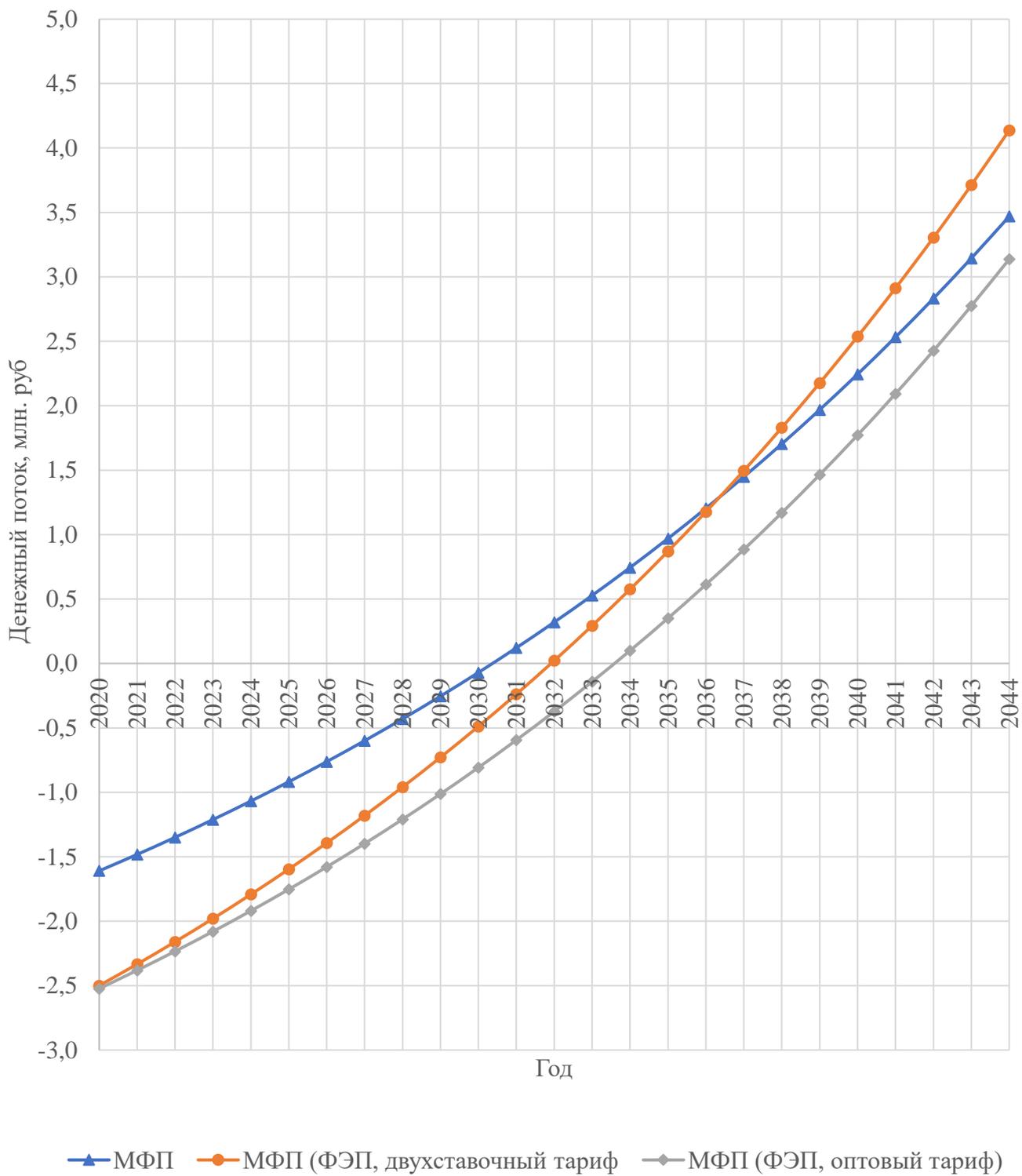


Рис. 17. График сроков окупаемости

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении диссертации приведены основные результаты и выводы:

1. Выполнено районирование распределения потенциала накопленной тепловой энергии в грунте в результате экзогенных процессов для регионов на территории РФ. Выполненная оценка показала, что потенциал тепловой энергии находится в диапазоне от 20 до 45 МДж/м<sup>3</sup>.

2. Разработана система использования грунтового низкотемпературного геотермального теплоснабжения в зданиях с ограждающими конструкциями, выполненными из многослойных фасадных панелей с вентилируемым воздушным зазором, позволяющая снизить расход энергии на отопление и вентиляцию зданий на 30-35% за отопительный период.

3. Проведены экспериментальные исследования свойств фотоэлектрических преобразователей на основе аморфного и монокристаллического кремния. В результате исследования были установлены зависимости между углом наклона к горизонту панелей и КПД для двух типов преобразователей. Было установлено, что при установке на вертикальную поверхность КПД снижается на 32-33% для ФЭП на основе аморфного и монокристаллического кремния относительно максимального.

4. Проведены теоретические исследования потенциала фасадной солнечной электростанции для регионов с различной суммарной солнечной радиацией. Использование солнечного фасада позволяет снизить затраты электроэнергии на работу оборудования за отопительный период более чем на 10% (12 780 кВт·ч для анализируемого случая).

5. Разработана расчетная параметрическая модель многослойной фасадной панели с вентилируемым зазором для зданий с солнечно-геотермальным энергоснабжением.

6. Разработана методика определения оптимальных параметров многослойной фасадной панели с вентилируемым воздушным зазором для зданий с солнечно-геотермальным энергоснабжением. Методика, разработанная на основе теории планирования факторного эксперимента, позволяет определять оптимальные толщины теплоизоляционных слоев и величину воздушного зазора для разных климатических условий.

7. Разработана параметрическая модель грунтового воздушного теплообменника для подбора оптимальной величины трубы и массового расхода воздуха. Результаты расчетов показали, что использование грунтового коллектора позволяет снизить затраты электроэнергии на подогрев приточного воздуха на 40% (88 548 кВт·ч для анализируемого случая) за отопительный период.

8. Проведена энергетическая, экономическая и экологическая оценка теплоснабжения зданий на основе возобновляемых источников энергии с многослойной фасадной панелью с вентилируемым воздушным зазором. Применение энергоснабжения на основе низкопотенциальных источников энергии в зданиях показало свою эффективность и окупаемость в течение 10 лет. Система энергоснабжения зданий на основе низкопотенциальной и солнечной энергии показало свою эффективность и окупаемость в течение 11 лет. Энергетический сравнительный анализ показал, что при использовании системы теплоснабжения с МФП, тепловым насосом и грунтовым теплообменником затраты энергии на отопление и вентиляцию снижаются более чем на 30% (73 871 кВт·ч) относительно традиционного исполнения за отопительный период. Использование системы теплоснабжения с МФП, тепловым насосом, грунтовым теплообменником и фасадной сетевой солнечной электростанцией позволяет снизить энергопотребление на 40% (86 652 кВт·ч) относительно традиционного исполнения. Экологический анализ показывает снижение выбросов парниковых газов при применении МФП, теплового насоса, грунтового теплообменника, фасадной солнечной электростанции относительно традиционного варианта на 40%, что составляет около 16 тонн диоксида углерода за отопительный период. Объем сжигаемого природного газа сокращается на 12 800 м<sup>3</sup> (40%) для анализируемого случая.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ:

1. Шароварова Е.П. Использование фотоэлектрического питания аппарата ИВЛ «Фаза-21» на основе ФЭП третьего поколения / **Е.П. Шароварова**, С.Е. Щеклеин, В.Н. Алехин, М.А. Фадейкина, М.А. Плесников, Н.В. Перевозкин // СОК. – 2021. - №2. – С.74-77, 0.25 п.л./0.07 п.л.
2. Шароварова Е.П. Оценка эффективности использования тонкопленочных фотоэлектрических преобразователей на фасадах зданий / **Е.П. Шароварова**, С.Е. Щеклеин, В.Н. Алехин, М.А. Фадейкина, М.А. Плесников, Н.В. Перевозкин // СОК. – 2021. - №1. – С.61-63, 0.187 п.л./0.05 п.л.
3. Шароварова Е.П. Потенциал развития ВИЭ на территориях России с децентрализованным энергоснабжением / **Е.П. Шароварова**, В.Н. Алехин // СОК. – 2020. - №5. – С.54-55, 0.125 п.л./0.1 п.л.
4. Шароварова Е.П. Многослойная фасадная панель с воздушным зазором для энергоэффективных зданий с комплексом ВИЭ / **Е.П. Шароварова**, С.Е. Щеклеин, В.Н. Алехин, И.А. Степанов // СОК. - 2020.- №5. - С. 36 -40, 0.312 п.л./0.1 п.л.
5. Шароварова Е.П. Строительство энергоэффективных зданий в УрФО / **Е.П. Шароварова**, С.Е. Щеклеин, В.Н. Алехин // СОК. – 2020. - №4. – с.56-58, 0.187 п.л./0.08 п.л.
6. Sharovarova E.P. Multilayer Façade Panel Structure Analysis / **E.P. Sharovarova**, V.N. Alekhin, A.Y. Skachkov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (MSE). – 2020. №962(2), 022076, 0.375 п.л./0.2 п.л. (**WoS, Scopus**).
7. Sharovarova E.P. The potential for the development of renewable energy generation in Russian territories where the power supply system is decentralized / **E.P. Sharovarova**, V.N. Alekhin, L.I. Avdonina // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (MSE). – 2020. №962(2), 022075, 0.375 п.л./0.2 п.л. (**WoS, Scopus**).
8. Sharovarova E.P. Energy efficient technologies for residential buildings in Ural Region: Case study of reconstructed cowshed / **E.P. Sharovarova**, V.N. Alekhin, S.E. Shcheklein // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (MSE). – 2018. №451(1), 012045, 0.375 п.л./0.15 п.л. (**WoS, Scopus**).
9. Sharovarova E.P. Façade structures for energy-efficient buildings / **E.P. Sharovarova**, V.N. Alekhin, A.M. Budarin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (MSE). – 2018. №463(4), 042051, 0.375 п.л./0.2 п.л. (**Scopus**).
10. Sharovarova E.P. Green Technologies for Energy-Efficient Buildings in Cold Climate Conditions of Russia / **E.P. Sharovarova**, V.N. Alekhin, I.N. Maltseva // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (MSE). – 2017. №262(1), 012035, 0.375 п.л./0.18 п.л. (**WoS, Scopus**).
11. Sharovarova E.P. Sustainable strategies of urban planning / **E.P. Sharovarova**, V.N. Alekhin, A.V. Leyzerova // Procedia Engineering. – 2016. №150. P.2055-2061, 0.375 п.л./0.15 п.л. (**WoS, Scopus**).

**Патент на полезную модель:**

12. Пат. на полезную модель №191998 РФ. Многослойная фасадная панель / **Е.П. Шароварова**, В.Н. Алехин, А.М. Бударин. Оpubл. 29.08.2019. Бюл. №25.

**Публикации в других научных изданиях:**

13. Шароварова Е.П. Многослойные панели для энергоэффективных зданий с солнечно-геотермальным энергоснабжением / **Е.П. Шароварова**, С.Е. Щеклеин, В.Н. Алехин, А. Хуссейн, Н.Е. Новоселова // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. – 2021. - №2. – с.38-44, 0.375 п.л./0.2 п.л.