

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»  
Институт строительства и архитектуры  
Кафедра систем автоматизированного проектирования объектов строительства

На правах рукописи

ШАРОВАРОВА ЕКАТЕРИНА ПЕТРОВНА  
СОЛНЕЧНО-ГЕОТЕРМАЛЬНОЕ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЕ ЗДАНИЙ С  
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫМИ ФАСАДНЫМИ КОНСТРУКЦИЯМИ

05.14.08 – Энергоустановки на основе возобновляемых видов энергии

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:  
советник РААСН, доцент,  
кандидат технических наук,  
В.Н. Алехин

Екатеринбург – 2021

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
Глава 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ЗДАНИЙ.....	10
1.1 Современное состояние проблемы использования возобновляемых источников энергии в мире и в РФ .....	10
1.2 Обзор отечественных и зарубежных решений по внедрению в ограждающие конструкции энергосистем на основе возобновляемых источников энергии .....	18
1.3 Выводы к главе 1.....	22
Глава 2. СОЛНЕЧНО-ГЕОТЕРМАЛЬНОЕ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЕ ЗДАНИЙ С МНОГОСЛОЙНОЙ ФАСАДНОЙ ПАНЕЛЬЮ С ВОЗДУШНЫМ ЗАЗОРОМ.....	23
2.1 Описание концепции применения возобновляемых источников энергии в зданиях .....	23
2.2 Конструкция многослойной фасадной панели для зданий с солнечно-геотермальным энергоснабжением.....	31
2.3 Выводы к главе 2.....	39
Глава 3. ИНТЕГРИРОВАННАЯ ФАСАДНАЯ СЕТЕВАЯ СОЛНЕЧНАЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ.....	40
3.1 Характеристики сетевой солнечной электростанции .....	40
3.2 Методика и результаты экспериментального исследования фотоэлектрических преобразователей.....	44
3.3 Выводы к главе 4.....	53
Глава 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ И ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОСЛОЙНОЙ ФАСАДНОЙ ПАНЕЛИ ДЛЯ ЗДАНИЙ С КОМПЛЕКСОМ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ.....	54
4.1 Методика и результаты прочностного расчета МФП.....	54

4.2 Методика и результаты теплотехнического расчета МФП .....	74
4.2.1 Задание параметров здания.....	74
4.2.2 Расчетная модель фасадной конструкции.....	76
4.2.3 Свойства материалов расчетной модели МФП .....	80
4.2.4 Граничные условия расчетной модели.....	81
4.2.5 Уточнение параметров панели на первом этапе расчета на основе теории планирования эксперимента .....	85
4.2.6 Выбор оптимальных геометрических параметров МФП на втором этапе теплотехнических расчетов.....	89
4.2.7 Определение зависимости приведенного сопротивления теплопередаче МФП от изменения внешних условий на третьем этапе теплотехнических расчетов .....	94
4.3 Выводы к главе 4.....	110
Глава 5. АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МФП В ЗДАНИЯХ С КОМПЛЕКСОМ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ.....	111
5.1 Описание объектов анализа .....	111
5.1.1 Расчет горизонтального грунтового воздушного коллектора для зданий с многослойной фасадной панелью .....	112
5.1.2 Здание с многослойной фасадной панелью с использованием грунтового коллектора и теплового насоса .....	116
5.1.3 Здание с многослойной фасадной панелью с использованием грунтового коллектора, теплового насоса и фотоэлектрических преобразователей.....	117
5.1.4 Здание с традиционным вентилируемым фасадом, системой отопления, приточно-вытяжной системой вентиляции с рекуперацией тепла .....	118
5.2 Расчет сроков окупаемости.....	118

5.3 Экономический и экологический анализ использования МФП в зданиях с солнечно-геотермальным энергоснабжением .....	122
5.4 Выводы к главе 5 .....	123
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	124
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	127
Приложение А. ИСХОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ: РАЗМЕРЫ, ОБОРУДОВАНИЕ, МАТЕРИАЛЫ, ТАРИФЫ .....	136
Приложение Б. РАСЧЕТ ЗАТРАТ НА ОТОПЛЕНИЕ И ВЕНТИЛЯЦИЮ ВАРИАНТОВ 1,2.....	152
Приложение В. РАСЧЕТ ЗАТРАТ НА ОТОПЛЕНИЕ И ВЕНТИЛЯЦИЮ ВАРИАНТА 3 .....	155
Приложение Г. ПОЛНАЯ СТОИМОСТЬ РЕАЛИЗАЦИИ ДЛЯ ТРЕХ ВАРИАНТОВ.....	160
Приложение Д. РАСЧЕТ NPV СРАВНЕНИЕ А (Вариант 1 с вариантом 3) .....	162
Приложение Е. РАСЧЕТ NPV СРАВНЕНИЕ Б (Вариант 2 с продажей выработанной энергии по оптовому тарифу с вариантом 3).....	164
Приложение Ж. РАСЧЕТ NPV СРАВНЕНИЕ В (Вариант 2 с продажей выработанной энергии по двухставочному тарифу с вариантом 3) .....	166

## ВВЕДЕНИЕ

**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 энергетики 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 энергетики 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. Бутузов, В.И. Велькин, С.Е. Щеклеин, Е.В. Брянцева, П.П. Безруких, А.И. Сидельников, А.В. Тихонов, В.С. Афонин, С.Н. Мартиросов, А.И. Мелуа, С.В. Золокей, Я.М. Щелоков, С.О. Филатов, В.М. Пахалуев и другие.

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

**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 были поставлены 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 провести оптимизацию его параметров 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 анализы энергетической, экономической и экологической эффективности комплексного энергоснабжения малоэтажного здания солнечной и геотермальной энергией.

**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:

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

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

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

4. Проведены исследования эффективности применения солнечной фасадной электростанции;

5. 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.

**Теоретическая и 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 исследования.** 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.

**Степень достоверности.** 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 результатов.** Основные результаты диссертационной работы внедрены и используются в проектной деятельности ООО «ТЕХКОН», ООО «Третья Проектная», о чем свидетельствуют акты о внедрении. В частности,

приняты к использованию рекомендации по разработке систем геотермального энергоснабжения зданий. Результаты и положения диссертационной работы также используются в учебном процессе кафедры «Системы автоматизированного проектирования объектов строительства» Института Строительства и Архитектуры УрФУ при изучении вопросов, связанных с оптимизацией параметров тепловой оболочки здания.

**Публикации.** 13 печатных работ, в том числе 1 патент РФ на полезную модель, 5 статей опубликованы в изданиях входящих в «Перечень изданий, рекомендованных ВАК для публикации научных результатов работы диссертаций» и 6 в изданиях, индексируемых в международных системах цитирования Scopus и Web of Science.

## **Глава 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ЗДАНИЙ**

### **1.1 Современное состояние проблемы использования возобновляемых источников энергии в мире и в РФ**

В настоящее время в мировом сообществе особо актуальна проблема экономии энергетических ресурсов. Развитые страны в решении данной проблемы делают упор на сокращение удельного энергопотребления и рост использования возобновляемых источников энергии.

Основными факторами, влияющими на развитие в мире возобновляемой энергетики, являются:

- сокращение запасов топливных ресурсов,
- увеличение стоимости ископаемого топлива,
- быстрый рост населения земли,
- рост энергопотребления,

- повышение температуры биосферы,
- необходимость снижения выбросов парниковых газов и др.

На рисунке 1.1 [1] можно наблюдать резкий рост населения. К примеру, в 1987 году население Земли составляло 5 млрд. людей, в 2019 году численность приближается к отметке в 8 млрд. Одновременно с ростом численности населения планеты растет энергопотребление, в результате этого происходит резкое увеличение объемов выбросов парниковых газов (углекислого газа, метана, оксида азота и т.п.) (рисунок 1.2) [2]. По предполагаемым сценариям развития глобального потепления повышение температуры биосферы к 2100 году может составить  $5^{\circ}\text{C}$  [3].

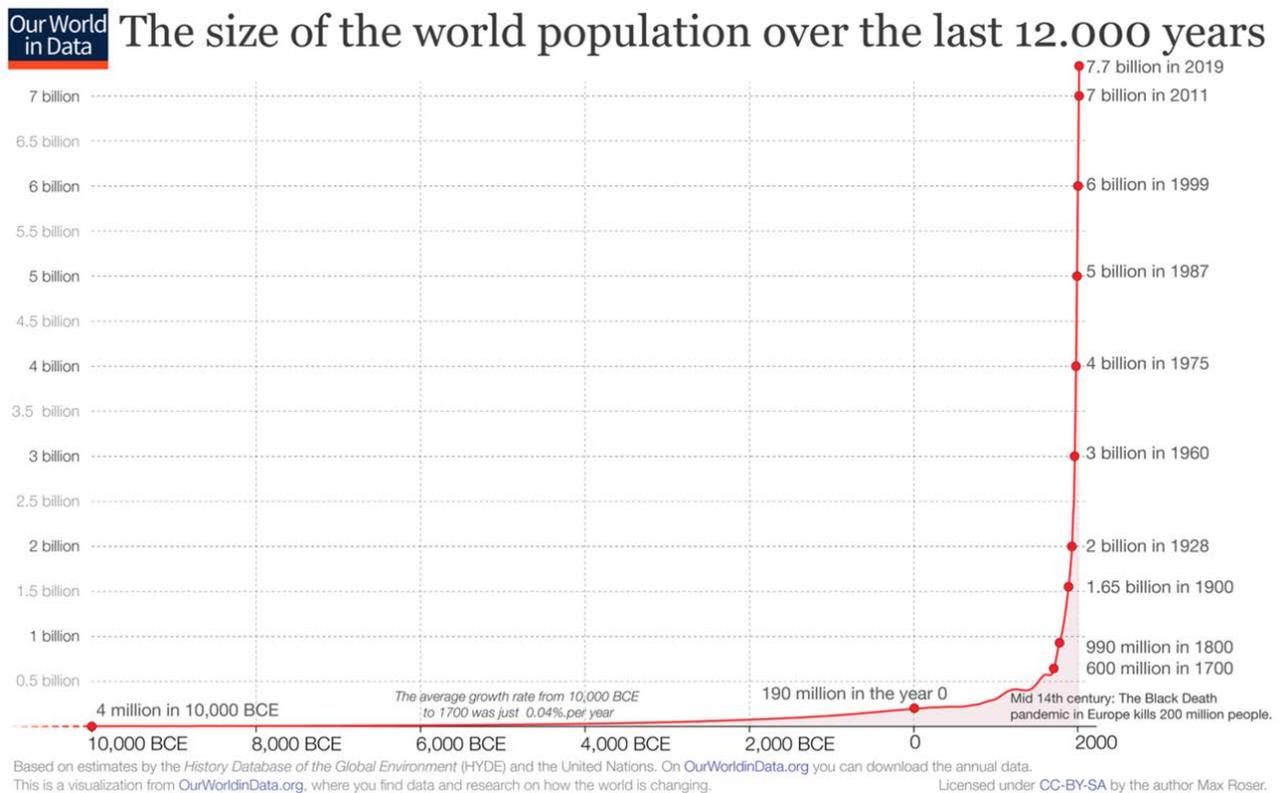


Рис. 1.1. График роста населения Земли [1]

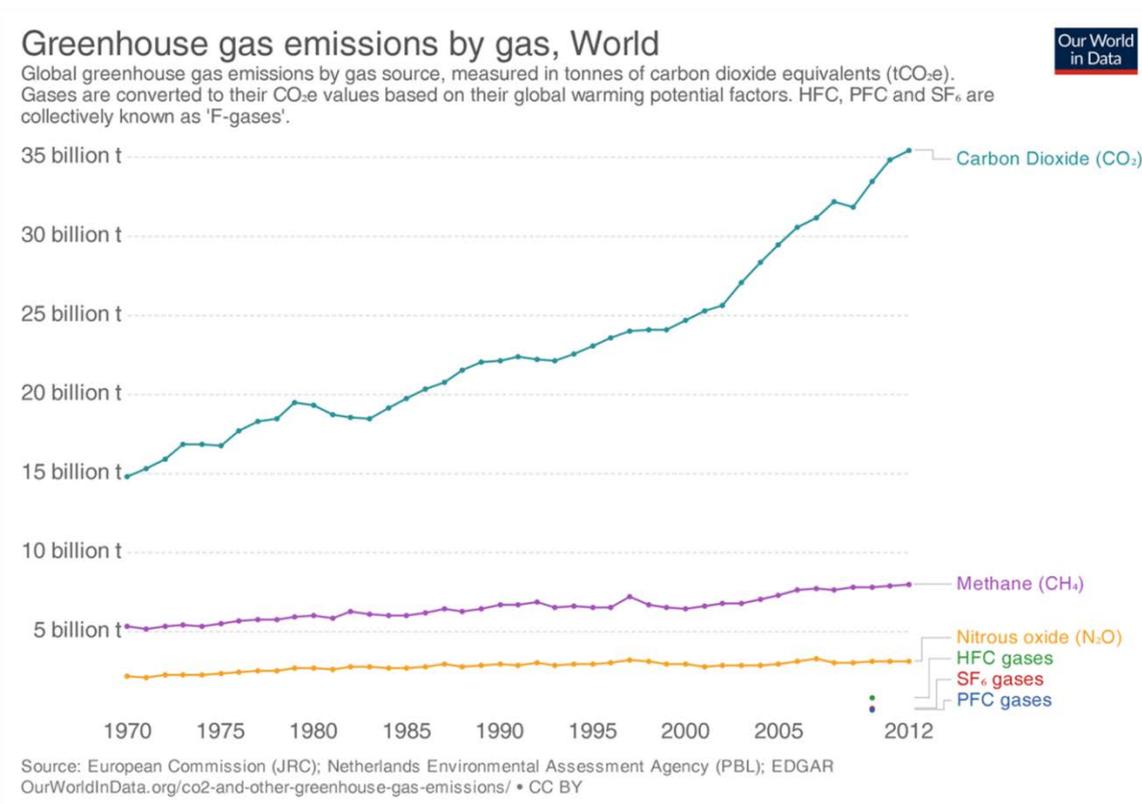


Рис. 1.2. График увеличения объемов выбросов парниковых газов [2]

Концепция устойчивого развития активно обсуждается, воплощается и популяризуется во всем мире. Она подразумевает под собой обеспечение безопасной окружающей природной среды, сохранение ресурсов для будущих поколений, ограничение негативного воздействия на окружающую среду, а также обеспечение рационального использования всех видов природных ресурсов при осуществлении любой градостроительной деятельности [4].

Растущий спрос на электроэнергию способствует заинтересованности в возобновляемой энергии. Страны Евросоюза выстроили стратегию по энергосбережению «ENERGYSTRATEGY 2020», направленную на сокращение выбросов парниковых газов более чем на 20%, увеличение доли возобновляемых источников энергии (ВИЭ) более чем на 20%, а также на экономию энергии не менее, чем на 20% к 2020 году [5]. В настоящее время Евросоюзом уже создана долгосрочная стратегия «ENERGYSTRATEGY 2050», направленная на сокращение выбросов парниковых газов более чем на 80-95% в сравнении с 1990 годом [6].

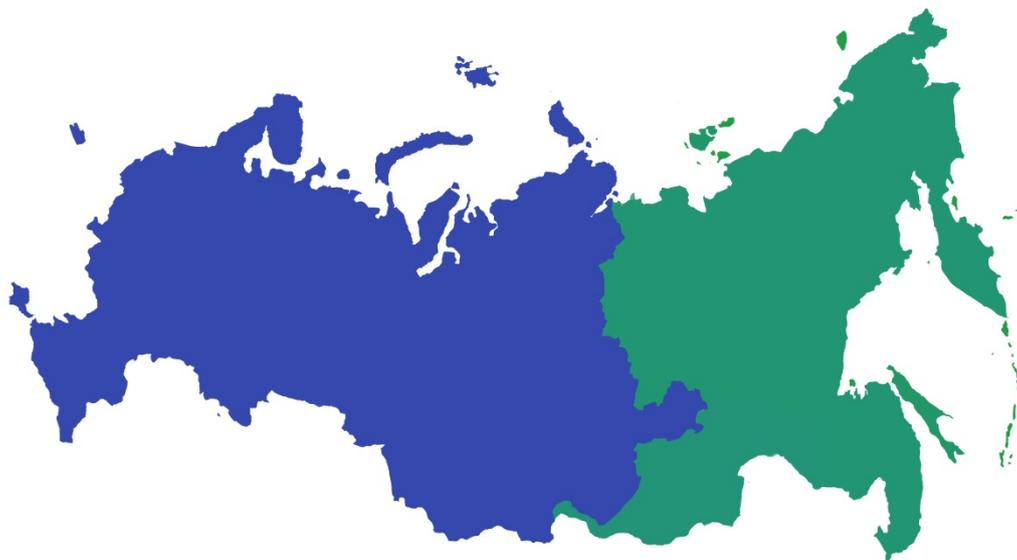
Фактическое потребление электрической энергии в Российской Федерации в 2019 г. составило 1075,2 млрд. кВт·ч и осталось практически на уровне 2018 г [7]. Между тем технический потенциал возобновляемых источников страны оценивается в 4,6 млрд.т.у.т./год, что в несколько раз превышает годовое энергопотребление. Экономический потенциал ВИЭ постоянно увеличивается в связи с удорожанием органического топлива и одновременным удешевлением технологий возобновляемой энергетики [8].

Государственная программа Российской Федерации «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2030 года», утвержденная Правительством РФ в 2009 г., направлена на совершенствование нормативно-правовой базы и реализацию механизмов повышения энергетической эффективности, повышение экологической безопасности, сокращение удельной энергоемкости валового внутреннего продукта более чем в 2 раза (по сравнению с уровнем 2005 года) [9].

Кроме того, согласно действующей Программы РФ по освоению территорий Дальнего Востока и Стратегией развития Арктической зоны развитие и создание новых технологий и конструкций для строительства зданий и сооружений в труднодоступных регионах с экстремальными природно-климатическими условиями становятся необходимыми. Отличительными особенностями данных регионов являются экстремальные природно-климатические условия, удаленность от основных промышленных центров, малая плотность населения. Как правило, в этих районах резервы ископаемого топлива ограничены или недоступны, строительство централизованных сетей энергопередачи зачастую технически невозможно.

К примеру, общая площадь регионов, входящих в Программу освоения земель Дальнего Востока (Республика Бурятия, Забайкальский край, Приморский край, Хабаровский край, ЕАО, Амурская область, Республика Саха, Магаданская область, Камчатский край, Сахалинская область, Чукотский АО) (рисунок 1.3), составляет 6 952 555 км<sup>2</sup>, а средняя плотность населения по перечисленным

областям и республикам составляет 1,2 чел/км<sup>2</sup>. Перечисленные особенности делают развитие таких территорий затруднительным.



*Рис. 1.3. Карта Российской Федерации с указанием осваиваемой территории Дальнего Востока*

Огромным потенциалом развития ВИЭ обладают территории России с децентрализованным энергоснабжением [10]. Энергетика сельского хозяйства России характеризуется рассредоточенностью сельских потребителей, невысокой потребительской мощностью, протяженностью электрических, тепловых и газовых сетей, малой плотностью населения территорий без централизованного энергоснабжения, на которых осуществляется сельскохозяйственное производство. Эти особенности формируют дополнительные требования по надежности к системам энергоснабжения вследствие существенного износа линий передач и низкого качества питания, сбоев и потери мощности в линиях. Сельские территории обладают огромным потенциалом развития возобновляемой энергетики для решения многих проблем энергоснабжения таких районов.

Большая часть сельских населенных пунктов Российской Федерации расположена в районах с децентрализованным энергоснабжением. Проблема энергообеспечения существенно влияет на условия жизни населения, демографическую ситуацию и развитие сельскохозяйственного производства на этих территориях. Значительная часть населенных пунктов, не имеющая доступа

к электросетям, питается от топливных генераторов. Ежегодно до 8 млн. тонн топлива и до 30 млн. тонн угля импортируется в районы Крайнего Севера, Дальнего Востока и Сибири, при этом для труднодоступных районов стоимость топлива превосходит цену мирового [11].

В некоторых случаях нехватка топлива ставит под угрозу жизни людей. По данным сельскохозяйственной переписи менее 35% крупных и средних сельскохозяйственных предприятий имеют доступ к централизованной системе газоснабжения, и только 20% из них подключены к централизованным системам отопления.

Территориями для запуска масштабного внедрения ВИЭ в России могут стать изолированные населенные пункты территории Арктики. Арктические регионы России имеют значительный потенциал для развития ВИЭ. В районах со средними скоростями ветра 6–7 м/с и более может развиваться ветроэнергетика. Имеются благоприятные условия для развития солнечной энергетики. Среднегодовое поступление энергии прямого солнечного излучения в Арктике варьируется от 2 до 5 кВт·ч/(м<sup>2</sup>·день). На Камчатке и Чукотке есть условия для развития геотермальной энергетики, в южной части западных регионов – для развития биоэнергетики на основе использования древесных отходов и низкосортной древесины. В более отдаленной перспективе интерес может представлять развитие приливной энергетики [12-13].

Низкая удельная мощность энергетических установок и их удаленное взаимоположение на огромных территориях обеспечивают максимальную эффективность внедрения энергосистем на основе ВИЭ. Эти особенности позволяют сократить сроки окупаемости и обосновать целесообразность их использования.

Более того, такие энергосистемы дают возможность поддерживать современный уровень доступности электроэнергии в малонаселенных пунктах, и их реализация является единственным вариантом достижения этой цели в большинстве случаев.

Для многих регионов России внедрение автономных и комплексных систем энергоснабжения с ВИЭ являются наиболее целесообразными. Как правило, интегрированные системы, основанные на различных видах ВИЭ, должны иметь возможность использовать весь эффективный период их работы. Такие системы должны быть спроектированы таким образом, чтобы ВИЭ выполняли функцию первичного источника энергии, в то время как другие источники энергии использовались бы в случае сбоя основного источника (или, к примеру, если мощности в настоящее время недостаточно).

Во всем мире можно отметить активное развитие технологий солнечной энергетики, на что непосредственным образом влияет доступность солнечных батарей. К примеру, в настоящее время стоимость тонкопленочных фотоэлементов третьего поколения составляет от 0.25\$ за 1 кВт. На рисунке 1.4 изображена кривая изменения цен солнечных панелей с 1976 года, где можно наблюдать равномерное снижение [14].

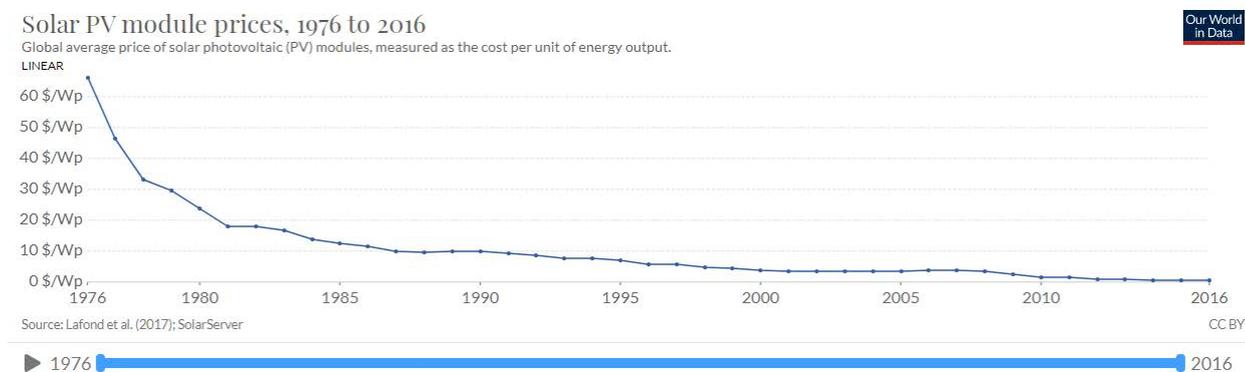


Рис. 1.4. График изменения стоимости солнечных панелей с 1976 г. по 2016 г. [14].

Методы регулирования климатической политики должны быть комплексными, поэтому, несмотря на богатство топливно-энергетических ресурсов России, вопросы энергосбережения должны быть отнесены к важным стратегическим задачам. Немаловажной ролью является энергосбережение в зданиях, так как в нем заложена значительная экономия энергетических ресурсов [11]. И эта роль становится приоритетной.

Одним из механизмов повышения энергосбережения является «зеленое» строительство. «Зеленые» здания подразумевают высокий уровень качества строительства при минимизации затрат и сохранении комфорта. Созданные стандарты способствуют скорейшему переходу от традиционного проектирования и строительства к устойчивому. Здания, спроектированные по «зеленым» стандартам, безопасны, менее негативно, чем традиционные, воздействуют на окружающую среду, а также значительно сохраняют энергетические ресурсы для будущих поколений.

Отечественный и зарубежный опыт показывает, что одним из наиболее эффективных путей в сокращении удельного энергопотребления являются мероприятия, связанные с дополнительной теплоизоляцией ограждающих конструкций, светопрозрачных ограждений, чердачных и технических пространств, а также рациональной эксплуатацией инженерных систем.

Исследования показывают, что только в сфере ЖКХ потенциальные ресурсы энергосбережения составляют более 50%. Проблемы энергосбережения в течение многих лет практически не решаются, в то время как механизмы внедрения энергоэффективных технологий и их стимулирование уже просто необходимы. Меры по снижению удельных затрат энергии на отопление, вентиляцию и освещение на стадии проектирования принимаются часто недостаточными. На рисунке 1.5 приведен анализ структуры потерь при потреблении тепла в жилье, на котором показано, что низкая эффективность теплоизоляции здания формирует до 23% тепловых потерь здания [15-16].

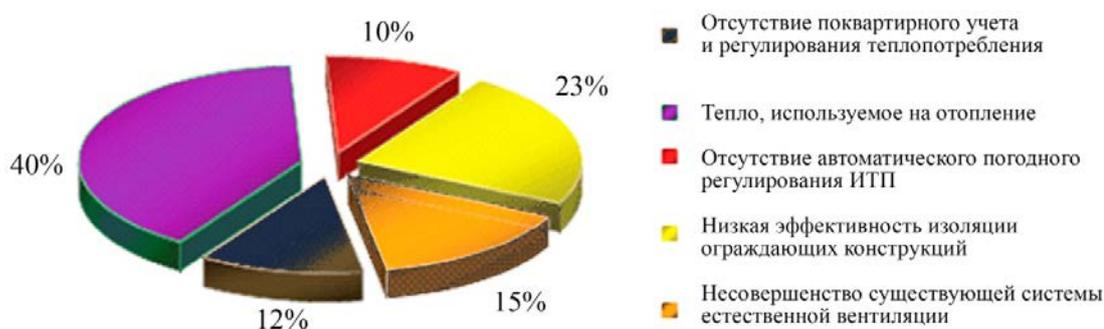


Рис. 1.5. Структура потребления тепла на отопление и вентиляцию

## **1.2 Обзор отечественных и зарубежных решений по внедрению в ограждающие конструкции энергосистем на основе возобновляемых источников энергии**

Современная архитектура и энергосберегающие технологии задают вектор развития в строительстве зданий и сооружений, направленный на снижение агрессивного влияния на окружающую среду. Строительство – один из сильнейших факторов антропогенного воздействия на природу.

Высокая эффективность использования ВИЭ в зданиях достигается в случае применения ограждающих конструкций с высокими теплоизолирующими характеристиками. Поскольку вклад ВИЭ нередко ограничен по различным причинам, здание должно иметь наименьшие потери энергии [17].

Большой вклад в развитие солнечной и геотермальной энергетики внесли отечественные ученые: Д.С. Стребков [18-19], В.А. Бутузов [20-22], В.В. Елистратов [23-24], С.Е. Щеклеин [25-27], В.М. Пахалуев [26,28], В.И. Велькин [29-30], П.П. Безруких [31], Н.П. Селиванов [32], А.Н. Сахаров [33-34], И.И. Анисимова [34], Е.В. Сарнацкий [32], А.Б. Алхасов [35-36]. В своих работах Н.П. Селиванов и Е.В. Сарнацкий сформировали общие принципы проектирования энергоактивных зданий [32]. Исследования на тему разработки энергоустановок на базе возобновляемых источников энергии представлены в диссертациях Е.В. Брянцевой [37], П.П. Безруких [31], В.А. Бутузова [20], А.И. Сидельникова [38], А.В. Тихонова [39], В.С. Афолина [40] и Аунг Ко [41].

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 [17].

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 теплоаккумуляторы теплоты, а в холодное время года отдает накопленное тепло в систему отопления. В данной системе возможно использование теплового насоса [26].

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 [42-44].

Известны 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. С увеличением толщины стены Тромба, увеличивается временной интервал до начала отдачи тепла помещению. Для улучшения теплоотдачи стены создаются специальные отверстия внизу и сверху стены для обеспечения естественной конвекции воздуха [45-46].

В концепции солнечного дома Дугласа Балкомба применен принцип обогрева жилых помещений с использованием двухсветной солнечной теплицы с

южной стороны. Это пространство является аккумулятором дневного тепла. Для сокращения теплопотерь ночью и в холодные дни, а также для защиты от перегрева в летнее время витраж снабжают жалюзи. Наружные стены помещений, ориентированные на другие стороны света, выполняют с минимальным количеством светопроемов [46].

Солнечный дом, построенный в Аризоне в США по проекту архитектора Питера Ли, решен прямоугольным объемом с плоской кровлей. Гелиоколлекторы системы отопления установлены на крыше над внутренним двориком в виде жалюзийной решетки, а также над южным фасадом дома. Положение пластин регулируется электродвигателем с часовым механизмом так, чтобы пластины коллектора были перпендикулярны солнечным лучам [47].

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. Такая конструкция позволяет снизить затраты на отопление на 50% [47].

Одним из трендов европейской архитектуры является система двойного фасада (*double-skin facade*). Основоположником идеи климатического фасада или фасада с "двойной" кожей считается известный архитектор Ле Корбюзье. Предложенная им в начале 20 века инновационная идея "нейтрализующей стены" ("*neutralizing wall*") заключалась в конструкции воздушного зазора между внутренним и внешним слоями фасада здания, в котором устанавливаются трубки для нагрева и охлаждения воздуха. В настоящее время конструкция двойного остекленного фасада особо распространена в высотном строительстве. Мировую известность получили такие здания с двойным фасадом, как Сити-Холл и небоскреб Мэри-Экс в Лондоне.

Конструкция фасада представляет собой две оболочки из стекла, обеспечивающие эстетическое оформление и выполняющие функцию ограждающей конструкции. В общем случае межстекольное пространство представляет из себя канал для прохода воздуха, который может сообщаться с

улицей, с помещениями и системой вентиляции при помощи открывающихся заслонок. Пространство между слоями служит не только каналом циркуляции воздуха; здесь размещаются электроприводы внутренних и наружных фрамуг, солнцезащитные устройства, трапы-проходы для обслуживания [48-49].

В зимнее время года приточный воздух поступает через наружные открытые фрамуги, проходит в межстекольное пространство, где подогревается за счет теплых стен и солнечной энергии, и затем поступает в помещения. В летнее время непрерывный поток уличного воздуха проходит вдоль фасада за счет естественной тяги, охлаждая здание без использования дополнительного кондиционирования. Наиболее эффективная схема работы климатического фасада совместно с приточной вентиляцией заключается в следующем: холодный воздух забирается через фрамуги в нижней части фасада, проходит вдоль наружной стены, подогревается и поступает в приточную систему вентиляции. В вентиляционной установке происходит нагрев воздуха до требуемой температуры помещений. Таким образом, тепловые потери здания через наружные стены нагревают воздух в зазоре.

Существенными преимуществами такого фасада является энергосбережение за счет использования естественной вентиляции, предварительного подогрева приточного воздуха зимой и использование солнечной энергии; повышенная шумозащита помещений в сравнении с традиционными фасадами.

Недостатками климатического фасада является высокая стоимость и эксплуатационные расходы на содержание подобной конструкции, связанные с трудозатратами очистки всех стеклянных поверхностей; сокращение полезной площади здания, а также пожароопасность при отсутствии перегородок и заслонок в вентилируемом пространстве.

Законодательная база многих стран имеет механизмы стимулирования для энергоустановок на основе возобновляемых источников энергии, интегрированных в здание, что существенно способствует развитию солнечных установок, интегрированных в здания. К примеру, в Германии действует закон о возобновляемых источниках энергии (EEG Renewable Energy Sources Act),

согласно которому установлено право на выплату премии за поставку энергии ВИЭ от арендодателя к арендатору для солнечных установок с установленной мощностью до 100 кВт, которые устанавливаются в жилом доме при условии, что не менее 40% площади здания занято жилыми помещениями [50].

### **1.3 Выводы к главе 1.**

В настоящее время особо актуальны технологии использования возобновляемых источников энергии для энергоснабжения зданий и сооружений. В связи с этим необходимо создание технологий энергоснабжения с использованием стабильных и неисчерпаемых видов энергии. При этом большая эффективность использования возобновляемых источников энергии достигается при ограждающих конструкциях зданий с высокими теплоизолирующими характеристиками.

– Проведен анализ состояния проблемы использования возобновляемых источников энергии в мире и РФ.

– Проведенный анализ отечественных и зарубежных решений по внедрению в ограждающие конструкции энергосистем на основе возобновляемых источников энергии позволил создать новый тип ограждающей конструкции для использования в зданиях с солнечно-геотермальным энергоснабжением.

## Глава 2. СОЛНЕЧНО-ГЕОТЕРМАЛЬНОЕ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЕ ЗДАНИЙ С МНОГОСЛОЙНОЙ ФАСАДНОЙ ПАНЕЛЬЮ С ВОЗДУШНЫМ ЗАЗОРОМ

### 2.1 Описание концепции применения возобновляемых источников энергии в зданиях

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 2.1 изображены графики изменения температуры грунта глубине 1,6 м и 3,2 метра в течение года для Екатеринбурга и Владивостока [51-53].

На рисунке 2.2 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

$$Q / V = \rho \cdot C \cdot (T_{1,6\text{м}}^{\text{сп.ср}} - T^{5\text{XC}}) \quad (2.1)$$

где  $\rho$  – плотность грунта;

$C$  – удельная теплоемкость грунта;

$T_{1,6\text{м}}^{\text{сп.ср}}$  – среднегодовая температура грунта на глубине 1,6 метра;

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

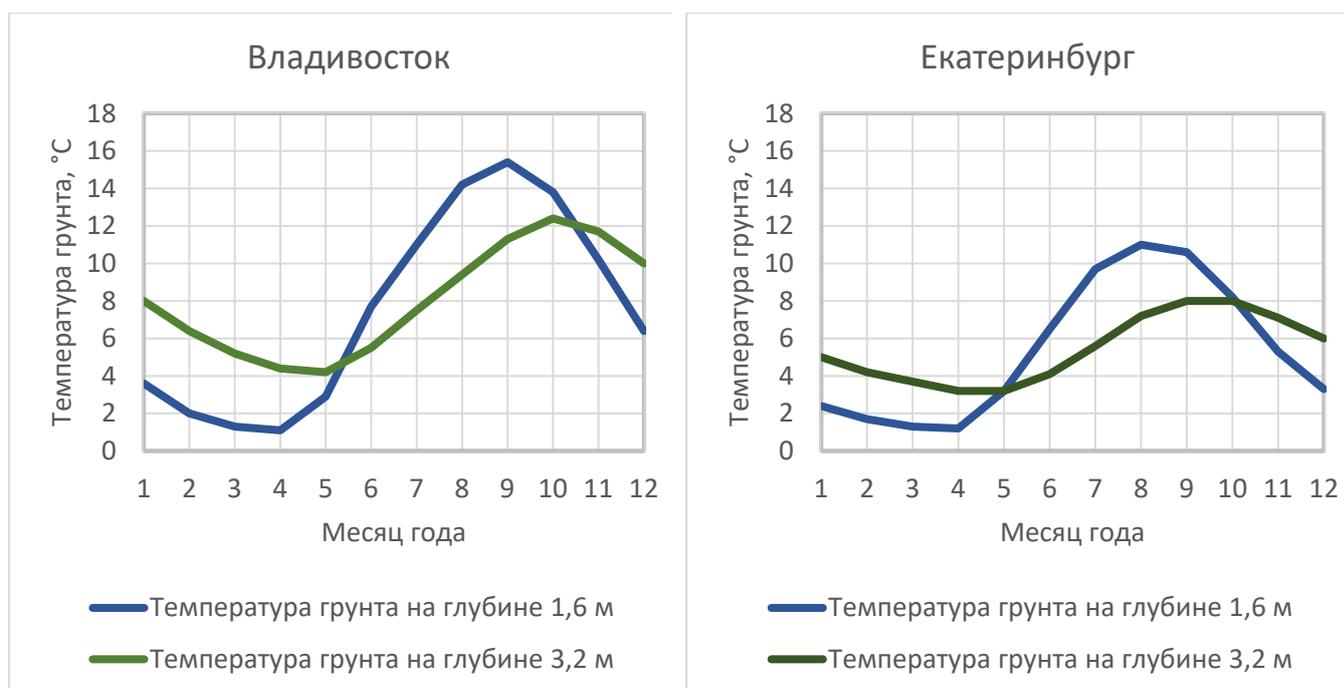


Рис. 2.1. График изменения температуры грунта на глубине 1,6 м, 3,2 м для Владивостока и Екатеринбурга

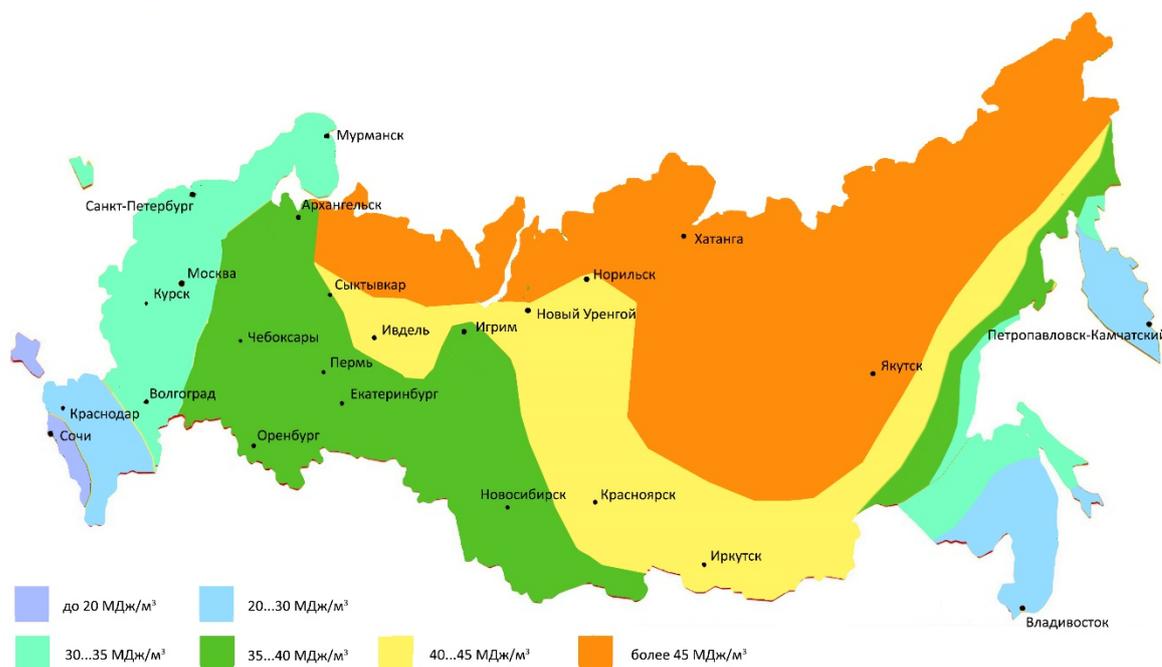
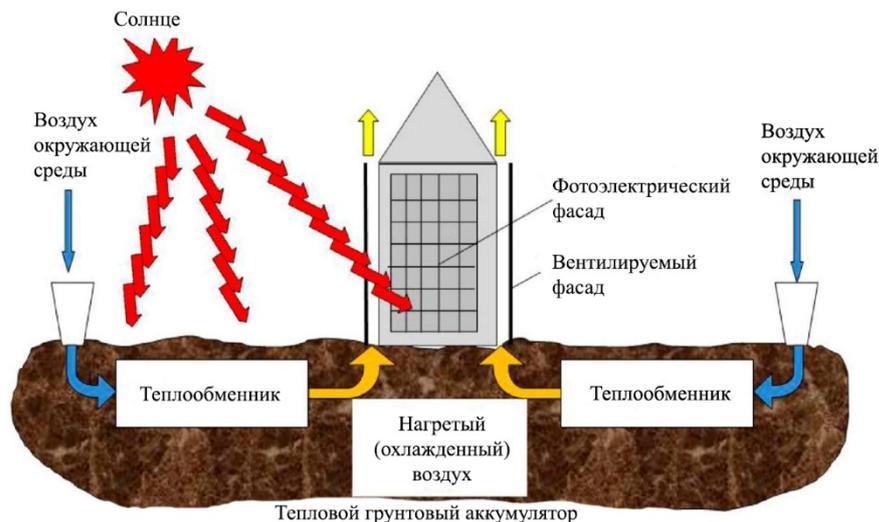


Рис. 2.2. Карта потенциала накопленной тепловой энергии в результате экзогенных процессов на территории РФ

Грунтовый коллектор представляет собой систему труб с циркулирующим по ним теплоносителем, осуществляющий отбор тепла от грунта и отвод к потребителю. Потребляемая энергия компенсируется теплопоступлениями 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 теплозащитную функцию и энергогенерирующую функцию за счет установленных с внешней стороны фасада солнечных панелей (рисунок 2.3). Фасадную систему предлагается выполнять из панелей с замкнутым воздушным вентилируемым зазором, в который подается теплый воздух, предварительно нагретый грунтовым теплообменником.



*Рис. 2.3. Концепция применения возобновляемых источников энергии в зданиях с фасадными панелями с вентилируемым воздушным зазором*

Результатом анализа современных фасадных решений явилось создание нового типа ограждающей конструкции - многослойной фасадной панели (МФП) [54-55]. Прототипом для МФП послужил один из трендов европейской архитектуры – климатический фасад, или фасад с «двойной кожей» (“double-skin façade” – с англ.). Конструкция МФП (рисунок 2.4) с воздушным вентилируемым зазором 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. Внутренняя поверхность цементных плит (1, 3) и теплоизоляция (2) соединяются клеевым составом.

Цементные плиты (1,3), изготовленные из сердечника на основе портландцемента и легкого минерального заполнителя, поверхности которого армированы стеклосеткой, защищают теплоизоляцию. Влагостойкость, устойчивость к поражению грибком и плесенью, долговечность, негорючесть позволяют сохранить минеральную вату в течение всего заявленного срока службы. По четырем углам внутреннего слоя панели устанавливаются крепежные элементы (11). Крепежный элемент представляет собой коробчатый уголок с пазом, в который заводится полка двутавра, образующего опорный элемент. Крепежный элемент соединяет все внутренние слои панели между собой и соединяется с каркасом из термопрофилей с помощью саморезов. Внутренний слой соединяется с несущим каркасом из перфорированных швеллеров (4) с помощью сварки: крепежный элемент по внутренней и наружной кромке приваривается к швеллерам.

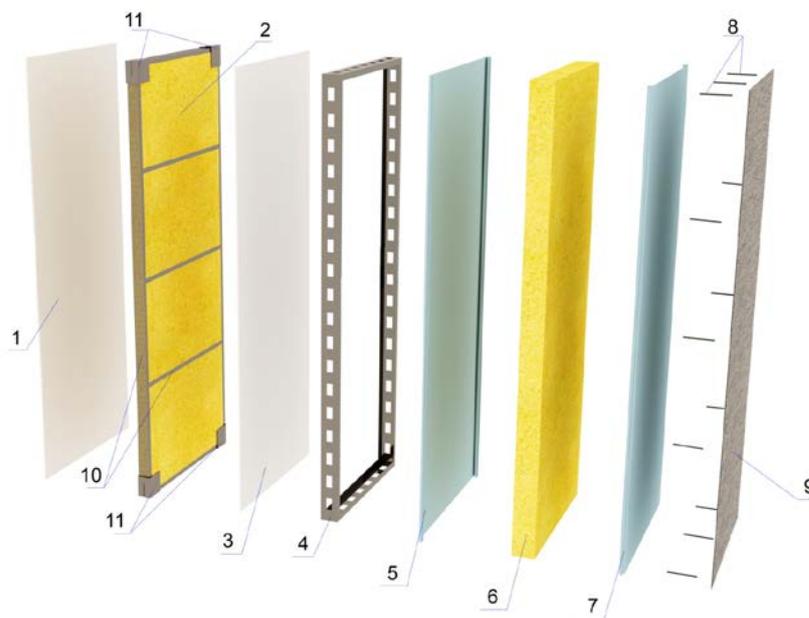


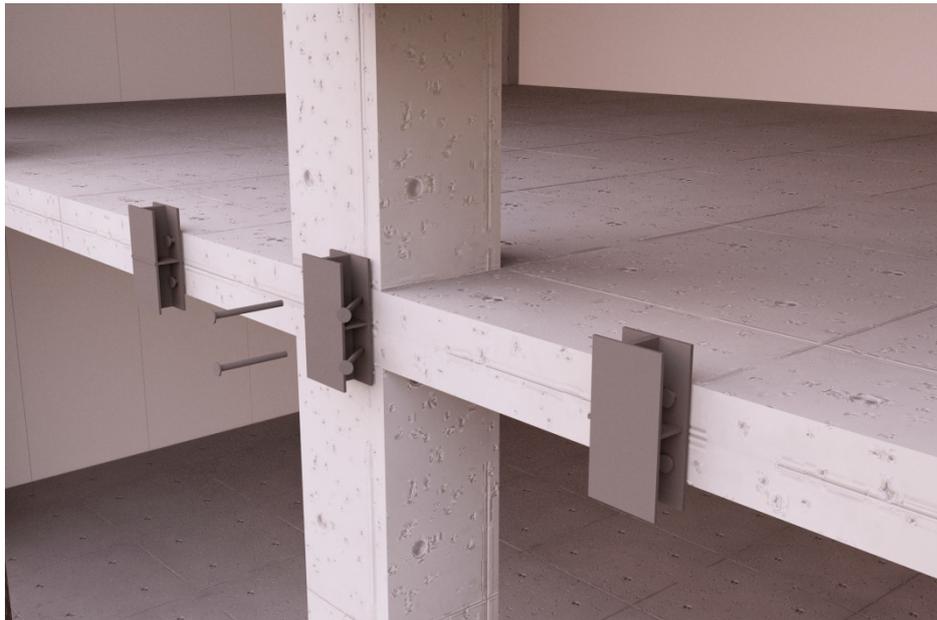
Рис. 2.4. Конструкция МФП с указанием слоев

Каркас (4) выполнен из швеллеров с перфорациями в горизонтальном и вертикальном направлениях для беспрепятственного движения воздуха.

Внешний слой панели представляет собой трехслойную сэндвич-панель заводского изготовления, образованную слоем теплоизоляции (6), облицованным алюминиевыми листами (5,7) с двух сторон. Соединение внешних слоев панелей производится в горизонтальном направлении при помощи замка Z-lock, в вертикальном направлении выполняется утепление и установка специального нащельника.

Внешний слой панели крепится к несущему каркасу с помощью саморезов (8). С внешней стороны панели может крепиться гибкая солнечная панель (9).

Опорный элемент представляет собой двутавр с ребрами, закрепляется на торце железобетонной плиты с помощью анкеров (рисунок 2.5).



*Рис. 2.5. Крепление опорного элемента к торцу монолитной плиты перекрытия*

Наружный алюминиевый слой можно окрашивать в любой цвет и придавать ему любую фактуру, меняя таким образом архитектурный облик здания. Современные технологии и оборудование для фотопечати позволяют наносить любой рисунок и текстуру на панели – имитацию дерева, металла, и т.д.

Защитные слои сохраняют теплоизоляцию на протяжении заявленного срока службы, препятствует ее разрыхлению, деформации и прониканию влаги внутрь панели, а также служат поверхностью, готовой для внутренней отделки изнутри.

Каркас, выполненный из перфорированных профилей для беспрепятственного движения воздуха, образует воздушный зазор по всей плоскости фасада здания. Герметичность конструкции стены, выполненной из данных фасадных панелей, позволяет использовать нагретый воздух в зазоре для снижения расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию.

С южной стороны фасада предусмотрена возможность монтажа на внешний алюминиевый лист МФП тонкопленочных фотоэлементов (поз. 9 на рисунке 2.4). Невысокая стоимость (от 0.25\$ за 1 Вт), КПД 12-20% модулей третьего поколения и высокая производительность при рассеянном свете по сравнению с кристаллическими аналогами делают целесообразным их использование, в том числе и в регионах с преимущественно пасмурной погодой. Некоторые виды модулей производят с прозрачностью до 20%, что позволяет применять такие тонкопленочные батареи на светопрозрачных конструкциях. Наиболее распространенными являются тонкопленочные батареи на основе аморфного кремния с КПД не более 12%. В настоящее время наиболее эффективны тонкопленочные фотоэлементы на основе индия, селена и меди с КПД около 20%.

Окна в зданиях можно выполнять «в пол», оставляя только парапетную панель. Также возможно устройство подоконной части из МФП, перфорации в несущем каркасе в горизонтальной плоскости не будут препятствовать движению воздуха. На рисунке 2.3 изображена схема поэлементного монтажа фасада здания. Монтаж панелей (1) начинается снизу вверх, завершает здание парапетная панель (2). Витраж (3) комплектуется замкнутой конструкцией (4), формирующей оконные откосы и узел сопряжения с панелями. На кровлю дополнительно могут быть установлены солнечные батареи (5).



*Рис. 2.6. Схема поэлементного монтажа ограждающих конструкций здания*

Для эффективной работы МФП может быть использован грунтовый теплообменник. На рисунке 2.7 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.

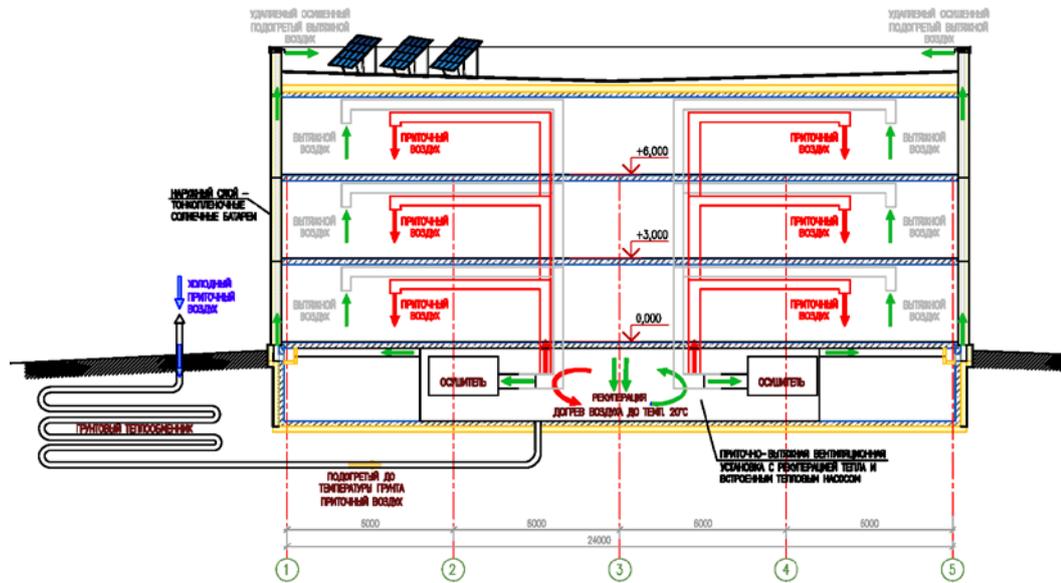


Рис. 2.7. Схема эффективной работы МФП с использованием грунтового теплообменника и фотоэлектрических преобразователей на южном фасаде

На рисунке 2.8 изображено, как теплый осушенный воздух из вентилируемого воздушного зазора поступает в чердачное пространство, после чего происходит удаление вытяжного воздуха наружу.

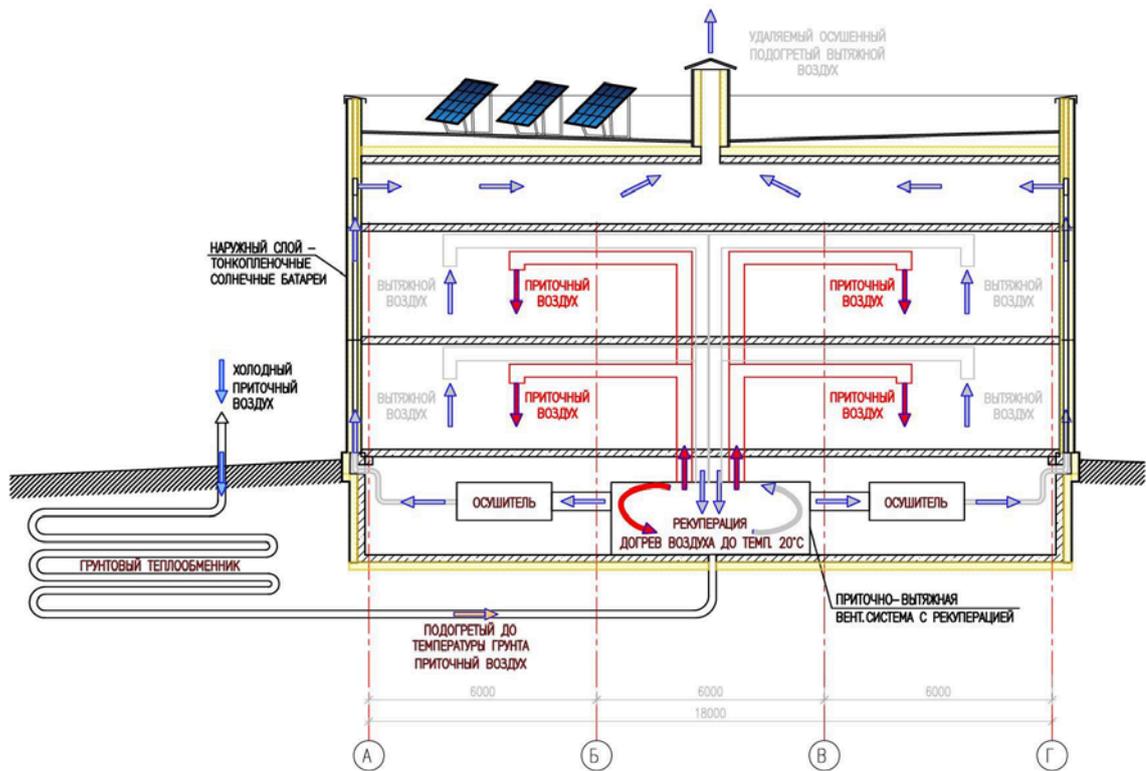


Рис. 2.8. Схема работы МФП (удаление теплого воздуха из зазора через чердачное пространство)

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. Выброс воздуха происходит через специальное отверстие в верхней части парапетной панели.

Панели, расположенные на южных фасадах, могут быть выполнены с дополнительным слоем – тонкопленочным фотоэлектрическим преобразователем.

## **2.2 Конструкция многослойной фасадной панели для зданий с солнечно-геотермальным энергоснабжением**

На рисунке 2.9 изображен общий вид МФП со стороны помещения и продольный разрез 1-1, на которых показано расположение термопрофилей внутреннего слоя, точки крепления цементных плит к внутреннему каркасу с помощью самонарезающих винтов, крепление термопрофилей к крепежным элементам. На рисунке 2.10 изображен поперечный разрез 2-2 по термопрофилю и разрез 3-3 по крепежному элементу. На рисунке 2.11 представлен опорный элемент (ОП) для рядовой МФП. С внешней стороны в полке двутавра выполнены монтажные отверстия для крепления ОП анкерами к торцу монолитной плиты перекрытия. На рисунке 2.12 изображены узлы соединения МФП в вертикальном и в горизонтальном направлениях. Герметичность наружного слоя из сэндвич-панелей в вертикальном направлении решается с помощью стыковочного элемента и установки специальной прокладки из

минеральной ваты, в горизонтальном направлении – замком Z-lock с силиконовым герметиком. Для герметизации остальных соединений со стороны вентилируемого зазора и помещений устанавливается специальный теплоизоляционный шнур. На рисунке 2.13 изображены в плане отверстия в распределительном лотке для установки труб, подводящих приточный воздух снизу в вентилируемый зазор МФП 1-го этажа. На сечении а-а показан узел соединения распределительного лотка и панели в уровне плиты перекрытия над подвалом. На рисунке 2.14 изображен другой вариант подвода приточного воздуха снизу панели с использованием конструкции утепленного подвесного потолка в зоне подачи воздуха, к которому подводятся утепленные вентиляционные каналы от осушителя. На рисунке 2.15 изображен крепежный элемент КП. На рисунке 2.16 изображена парапетная МФП, в верхней части панели запроектировано отверстие для отвода вытяжного воздуха из вентилируемого зазора, куда устанавливается утепленный клапан. На рисунке 2.17 представлен опорный элемент (ОП2) для парапетной панели. ОП2 устанавливается одновременно с МФП, крепление ОП2 производится к горизонтальной поверхности монолитного бортика покрытия кровли, полка двутаврового элемента ОП2 заводится в паз крепежного элемента КП парапетной панели.

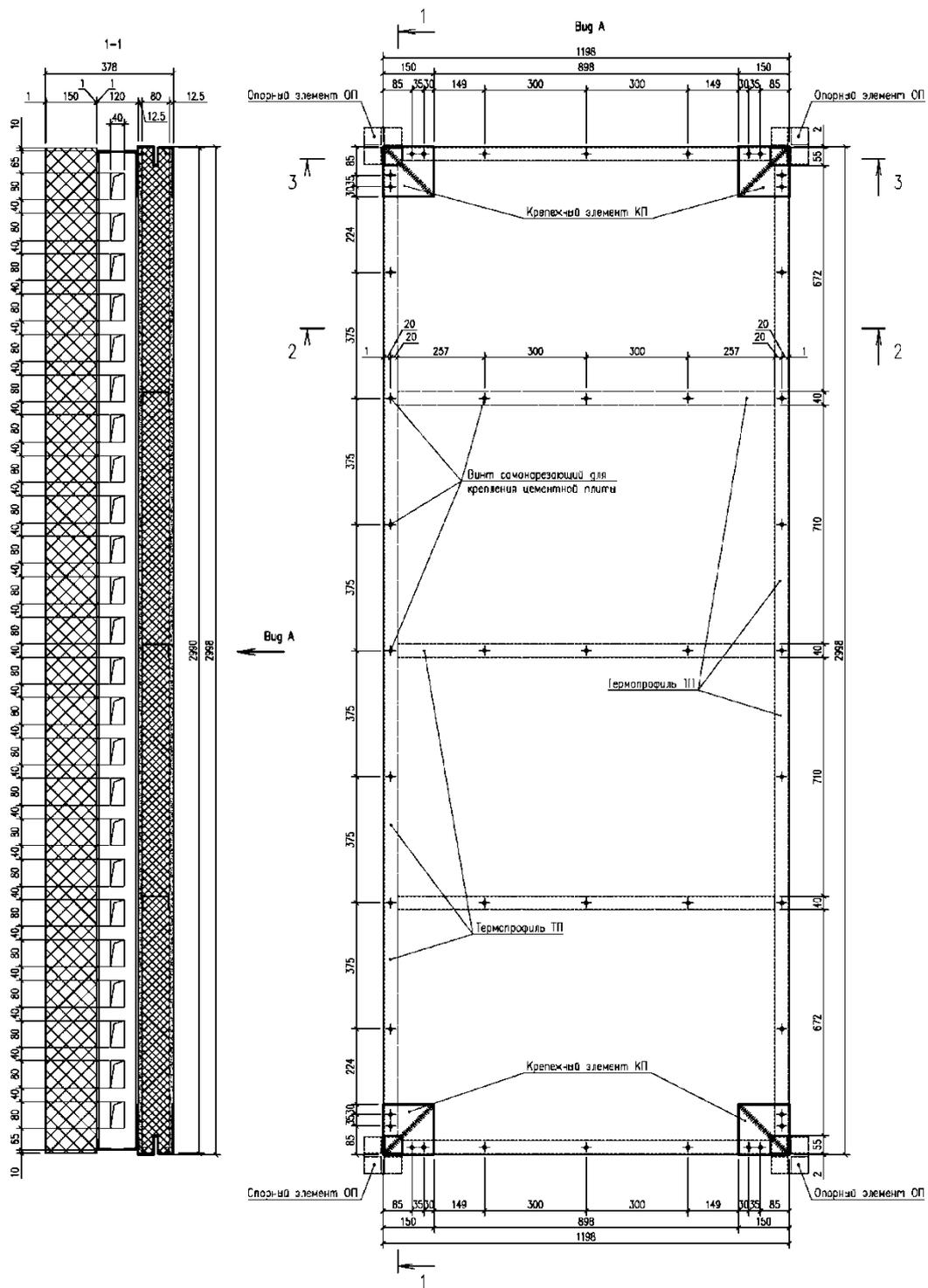


Рис. 2.9. Схема МФП (вид на внутреннюю поверхность). Разрез 1-1

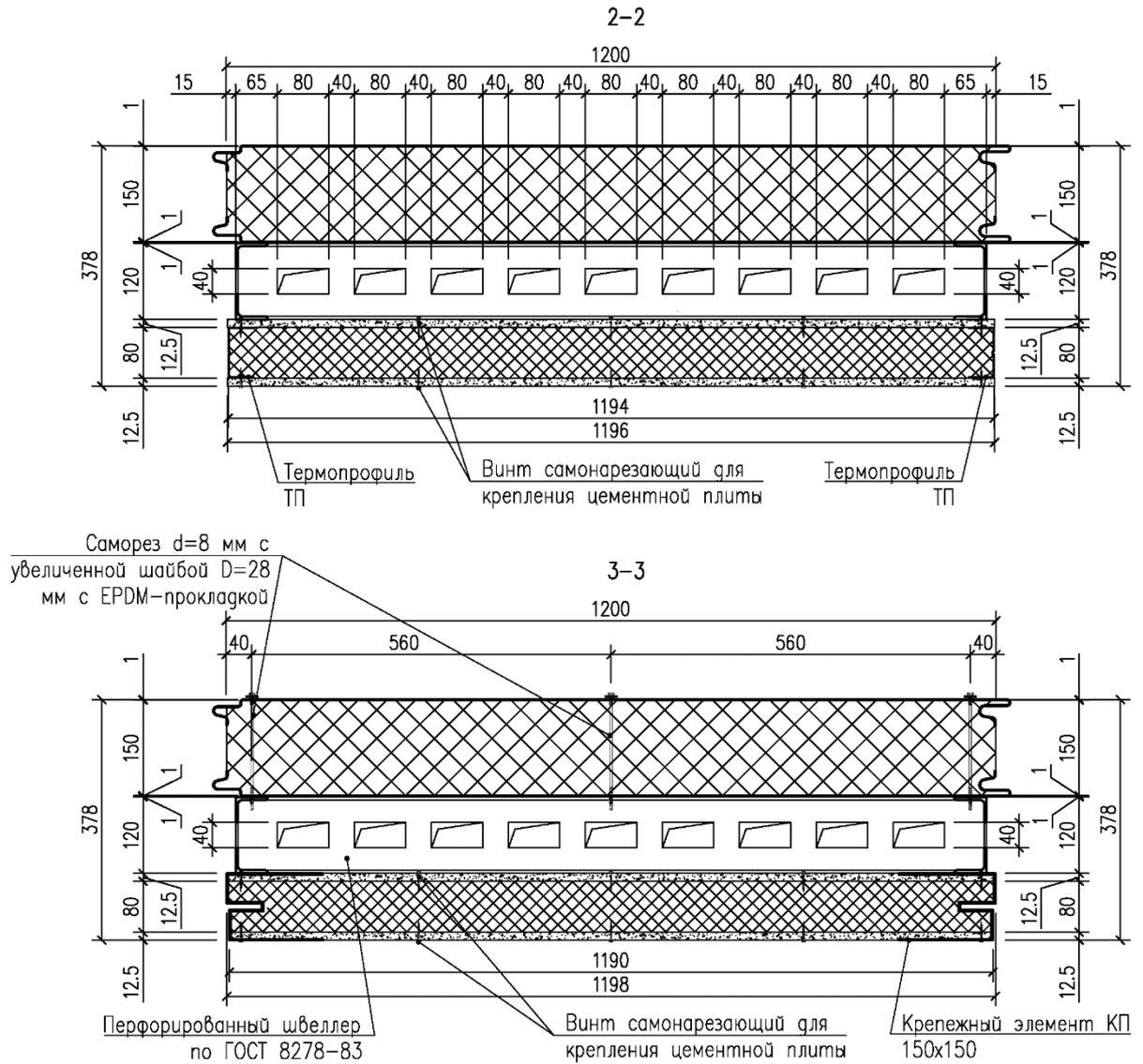


Рис. 2.10. Поперечные разрезы 2-2, 3-3 по МФП

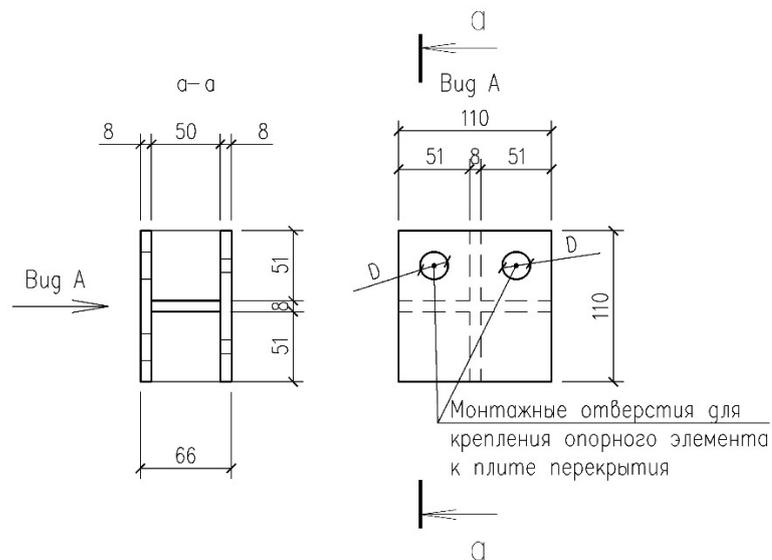


Рис. 2.11. Опорный элемент ОП для рядовой МФП

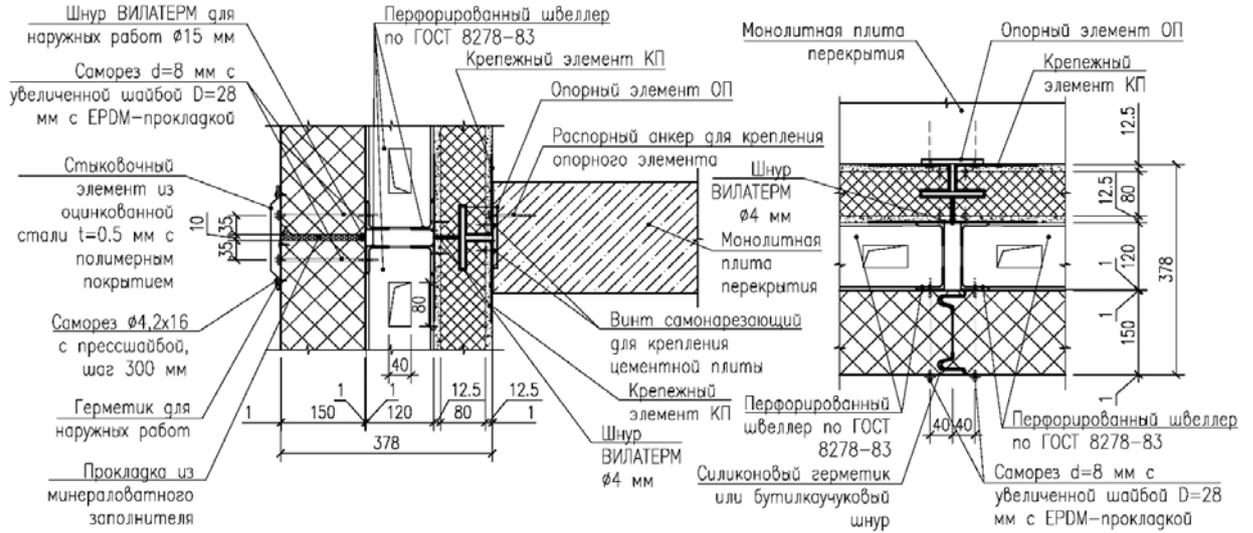
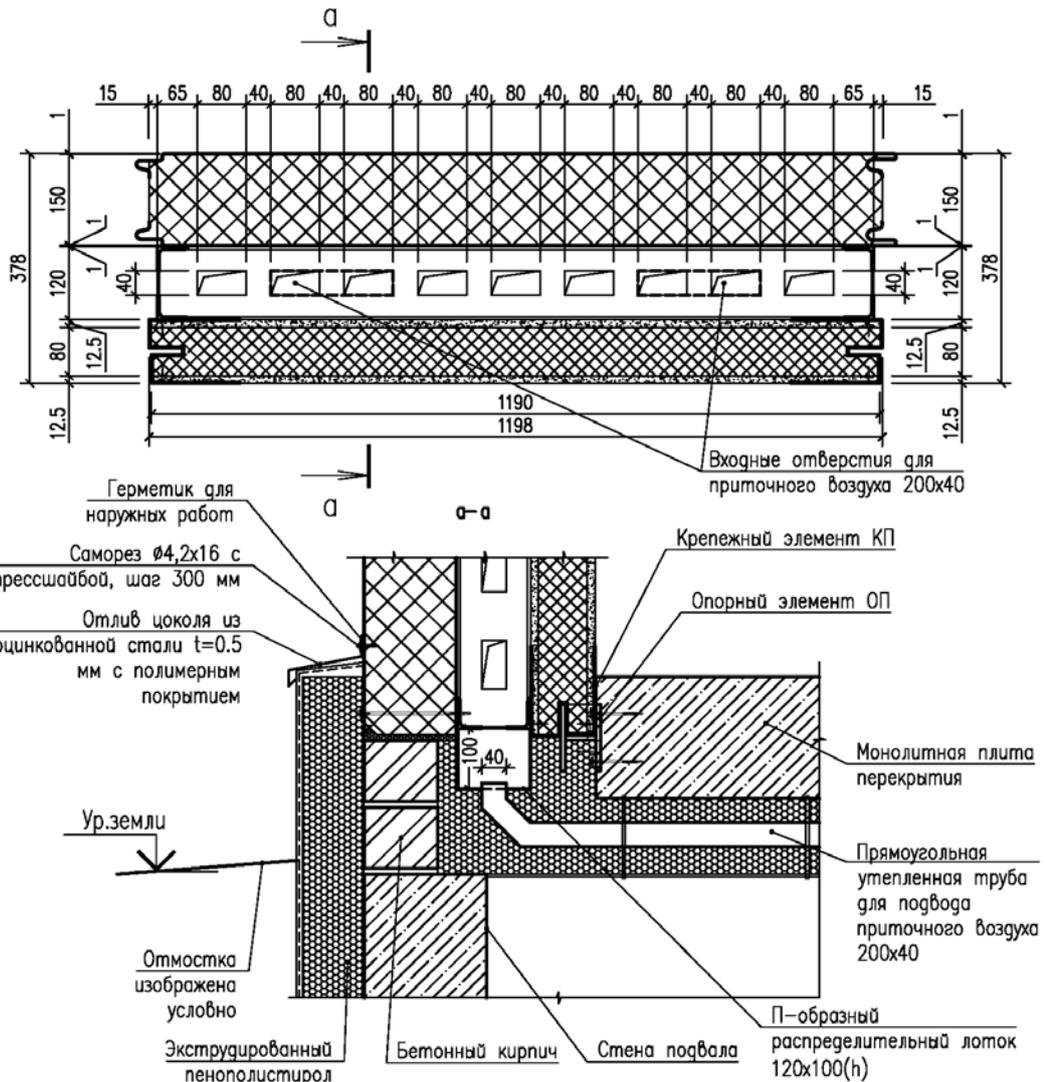


Рис. 2.12. Узлы соединения МФП

Рис. 2.13. План отверстий в распределительном лотке МФП.  
Узел примыкания лотка к МФП

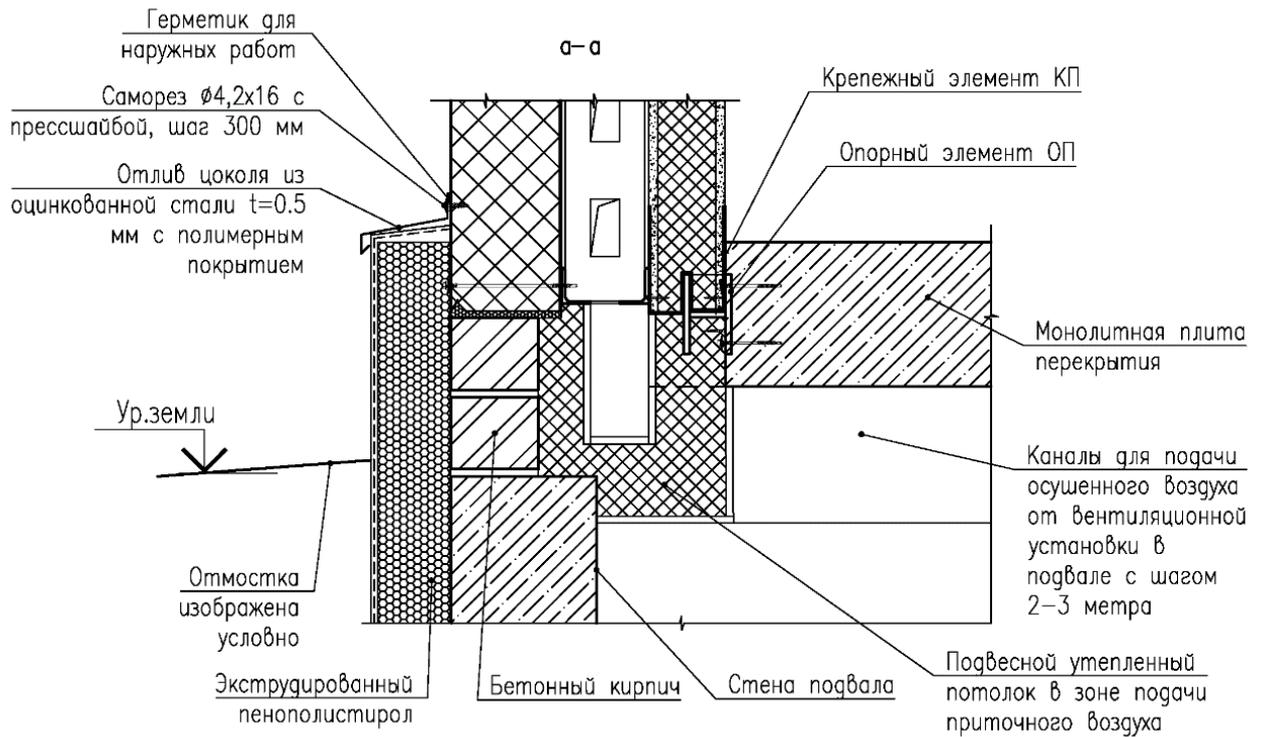


Рис. 2.14. Вариант подачи воздуха в МФП

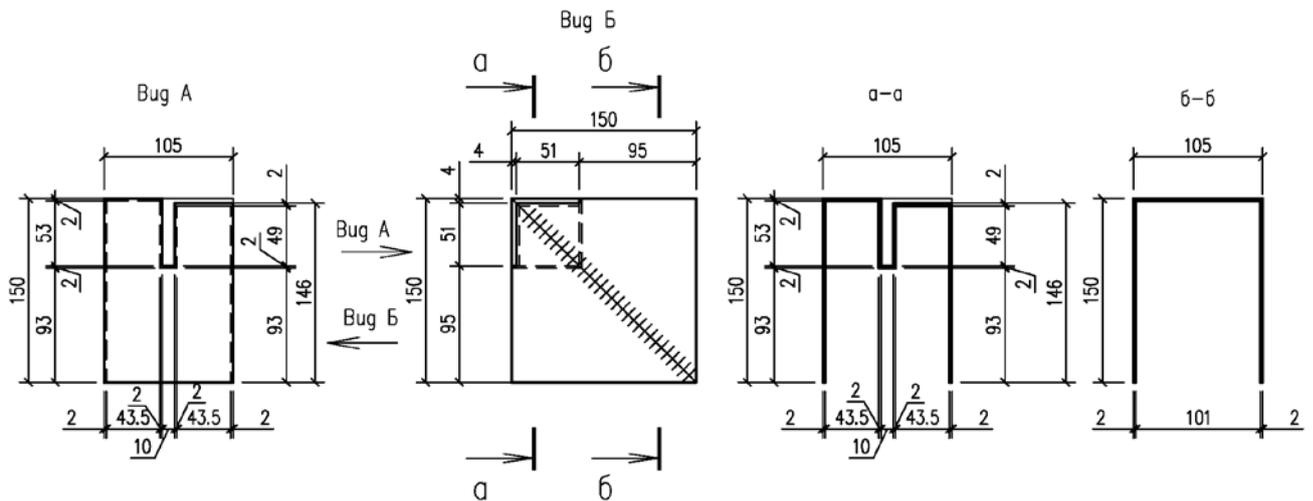


Рис. 2.15. Крепежный элемент КП



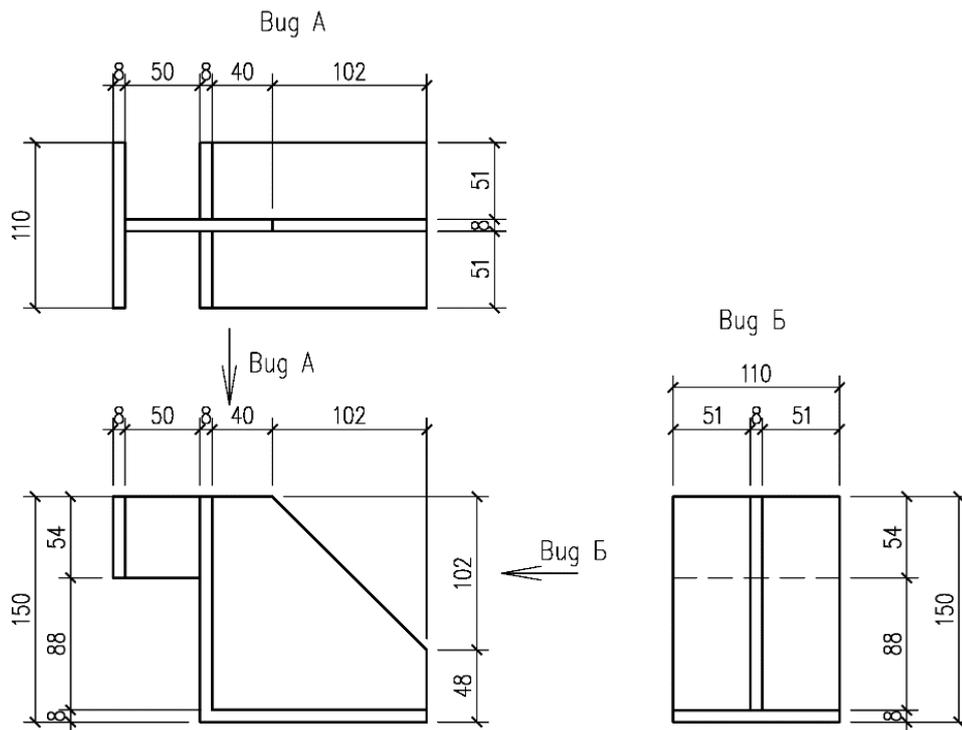


Рис. 2.17. Опорный элемент ОП2

Данную панель можно применять в регионах с различными климатическими условиями, изменяя некоторые параметры (толщины внутреннего и внешнего слоев теплоизоляции, размеры перфорированного профиля и перфораций, температуру приточного осушенного воздуха в зазор и другие). Панель предполагается заводского исполнения, возможно применение МФП как самостоятельной навесной ограждающей конструкции с креплением к плитам перекрытия или системе фахверка, а также использование при реконструкции зданий как систему утепления и облицовки фасада.

Преимущество многослойной фасадной панели состоит в значительном снижении ресурсоемкости и упрощении монтажа фасада, повышении срока службы теплоизоляции, а также снижения энергопотребления здания.

### **2.3 Выводы к главе 2**

- Проведен анализ потенциала накопленной солнечной энергии в результате экзогенных процессов на территории РФ.
- Предложена и разработана новая концепция применения возобновляемых источников энергии в зданиях с целью повышения их энергетической эффективности.
- Разработаны конструктивные решения многослойной фасадной панели для использования в зданиях с солнечно-геотермальным энергоснабжением.

## Глава 3. ИНТЕГРИРОВАННАЯ ФАСАДНАЯ СЕТЕВАЯ СОЛНЕЧНАЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ

### 3.1 Характеристики сетевой солнечной электростанции

Снаружи многослойная фасадная панель может быть дополнена фотоэлектрическим преобразователем. На примере трехэтажного жилого здания рассмотрено устройство сетевой солнечной электростанции, интегрированной в южный фасад.

На рисунке 3.1 схематично изображен южный фасад. На каждой МФП можно разместить 6 фотоэлектрических преобразователей мощностью 100 Вт с эффективностью 20% (18 В, 5,56 А). Всего на фасаде разместилось 162 солнечных панели.

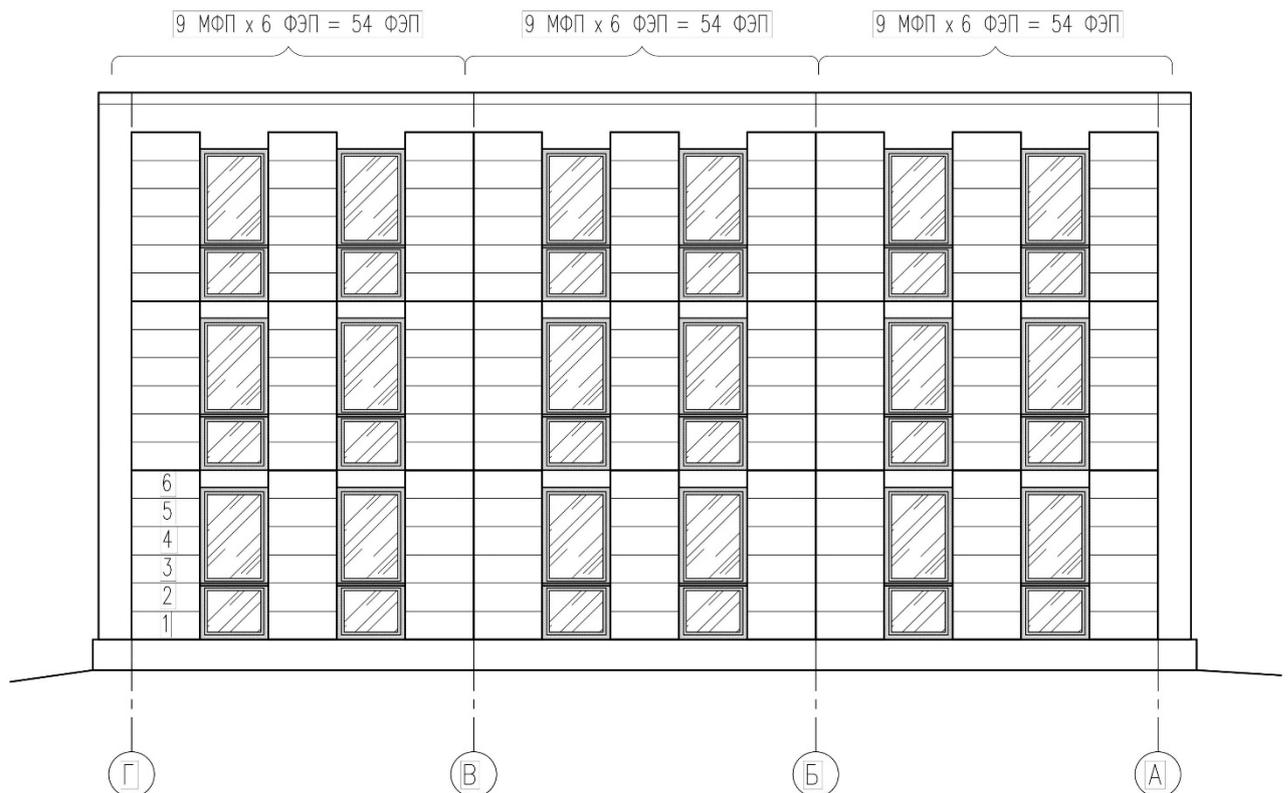


Рис. 3.1. Южный фасад с расположенными фотоэлектрическими преобразователями

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 3.2.

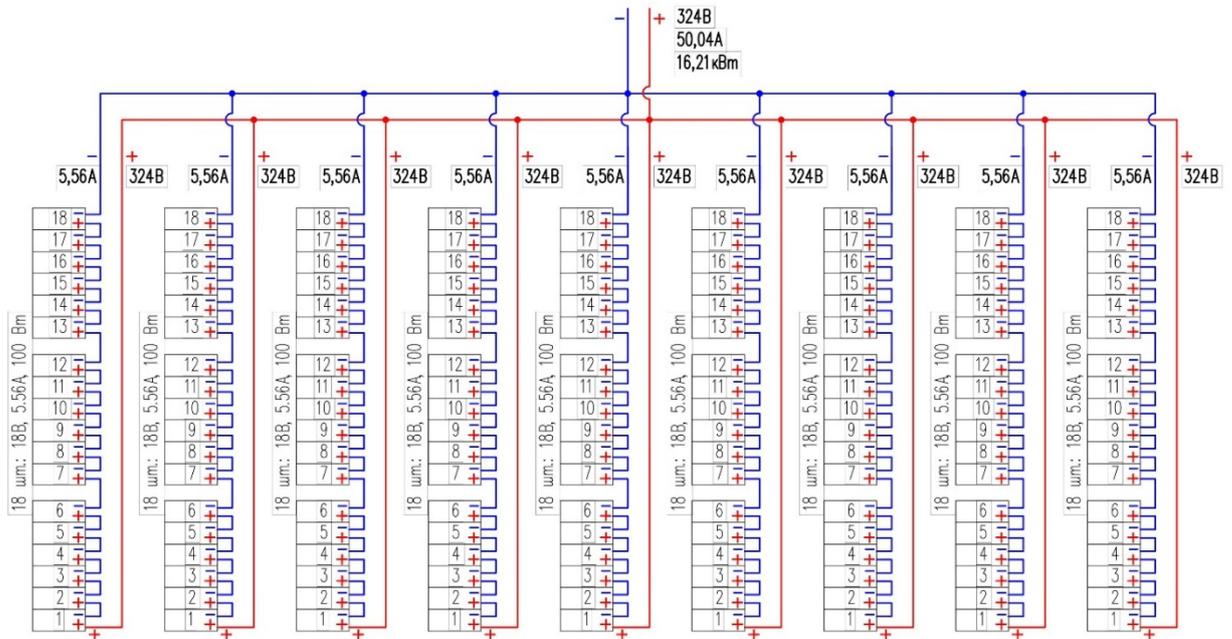


Рис. 3.2. Схема соединения солнечных панелей

На рисунке 3.3 представлена схема соединения интегрированных солнечных панелей с городской сетью через сетевой герметичный трехфазный инвертор с встроенными МРРТ-контроллерами.

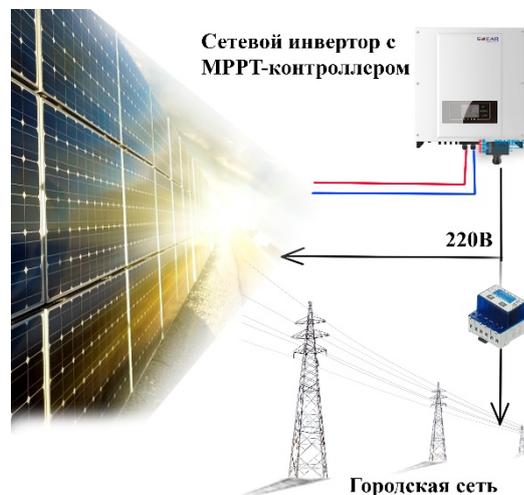


Рис. 3.3. Условная схема солнечной электростанции

Расчетное количество проживающих человек в здании – 29 чел.

Проведен сравнительный анализ выработки энергии солнечными панелями для Екатеринбурга и Севастополя.

В соответствии с нормативами потребления коммунальной услуги по электроснабжению в жилых помещениях для многоквартирных домов, оборудованных электрическими плитами, норматив потребления на 1 человека в месяц (кВт·ч) составляет для Свердловской области:

- 117 кВт·ч для 2-комнатных квартир;
- 99 кВт·ч для 3-комнатных квартир;
- 85 кВт·ч для 4-комнатных квартир.

Норматив потребления коммунальной услуги по электроснабжению для республики Крым составляет:

- 108 кВт·ч для 2-комнатных квартир;
- 91 кВт·ч для 3-комнатных квартир;
- 79 кВт·ч для 4-комнатных квартир.

Значения суммарной солнечной радиации (прямой и рассеянной) при безоблачном небе на вертикальную поверхность, ориентированную на юг, составляет 1776,94 кВт·ч/м<sup>2</sup> для Екатеринбурга и 1804 кВт·ч/м<sup>2</sup> для Севастополя [56]. Дополнительно был вычислен коэффициент, равный отношению количеству ясных дней в году к количеству дней в году. Для Екатеринбурга количество ясных дней в среднем составляет 135 дней, для Севастополя – 300 дней.

Суммарная годовая солнечная радиация с учетом принятого коэффициента для Екатеринбурга равна 657,47 кВт·ч/м<sup>2</sup>, для Севастополя – 1479,19 кВт·ч/м<sup>2</sup>.

В таблице 3.1 приведено суммарное энергопотребление жилого дома для двух городов.

Таблица 3.1

## Суммарное потребление электроэнергии для квартир жилого дома

Город	Количество комнат в квартире	2К	3К	4К	Всего:
	Количество проживающих в квартире, чел.	2	15	12	29
Екатеринбург	Норматив потребления на чел.в месяц, кВт·ч	117	99	85	
	Потребление по квартирам в месяц, кВт·ч	234	1485	1020	2739
	Потребление по квартирам в год, кВт·ч	2808	17820	12240	32868
Севастополь	Норматив потребления на чел.в месяц, кВт·ч	108	91	79	
	Потребление по квартирам в месяц, кВт·ч	216	1365	948	2529
	Потребление по квартирам в год, кВт·ч	2592	16380	11376	30348

В таблице 3.2 приведены выработки электроэнергии солнечными панелями с разными КПД – 10%, 15%, 20%. При площади панелей, установленных на южный фасад здания, равной 97,2 м<sup>2</sup>, 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 жильцами.

Таблица 3.2

## 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 солнечной радиации, поступающей на фасад, кВт·ч	63 906,08	143 777,27	Екатеринбург	Севастополь
Выработка энергии ФЭП (с КПД 10%), кВт·ч	6 390,60	14 377,70	19,4	47,37
Выработка энергии ФЭП (с КПД 15%), кВт·ч	9 585,91	21 566,55	29,16	71,06
Выработка энергии ФЭП (с КПД 20%), кВт·ч	12 781,20	28 755,40	38,88	94,75

В соответствии с принятыми поправками к Федеральному закону №35 «Об электроэнергетике» введено понятие о микрогенерации – о частных электростанциях мощностью до 15 кВт. В том случае, если мощность электростанции для выбранного жилого дома составит менее 15 кВт, в летний период при избытке выработанной энергии сверх собственного потребления, энергоснабжающим организациям предписывается покупать энергию, выработанную микрогенерирующими установками по установленному на данной территории оптовому тарифу. Закон не содержит разрешения на взаимозачетную компенсацию выданной в сеть электроэнергии, что существенно влияет на стагнацию в развитии возобновляемой энергетики [57].

### **3.2 Методика и результаты экспериментального исследования фотоэлектрических преобразователей**

Задачи эксперимента формулируются следующим образом:

- Исследовать энергетические характеристики тонкопленочных преобразователей.
- Проанализировать изменение КПД панелей на основе аморфного и монокристаллического кремния в зависимости от угла наклона к горизонту.
- Сравнить значения КПД панелей на основе аморфного и монокристаллического кремния при одинаковых условиях солнечной инсоляции.

В летний период 2020 года были проведены экспериментальные исследования энергетических характеристик фотоэлектрических преобразователей фирмы Uni-Solar (Китай). Моделирование электрических нагрузок 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. Экспериментальная установка представляет собой подложку из ОСП на усиленной деревянной раме, на которую наклеена гибкая солнечная панель на специальной клеевой подложке (рисунок 3.4).

Дополнительно панель зафиксирована металлическими зажимами по периметру с шагом 60 см. ФЭП производства «Uni-Solar» изготовлена из аморфного кремния. Размеры панели – 5000x390 мм (20 ячеек с размерами 356x239 мм). Номинальная мощность панели - 144 Вт. Номинальное выходное напряжение 24 В. Паспортный КПД 14%. Производитель отмечает такие преимущества панели, как легкий вес, гибкость конструкции, возможность установки на кровле, не нарушая гидроизоляционный слой, высокая производительность при частичном затенении и высоких температурах. Солнечная панель стационарно ориентирована на юг под углом 60°. Территория, где проводилось тестирование, расположена на 56°50' с.ш. На рисунке 4.5 представлена фотография экспериментальной установки [58-59].

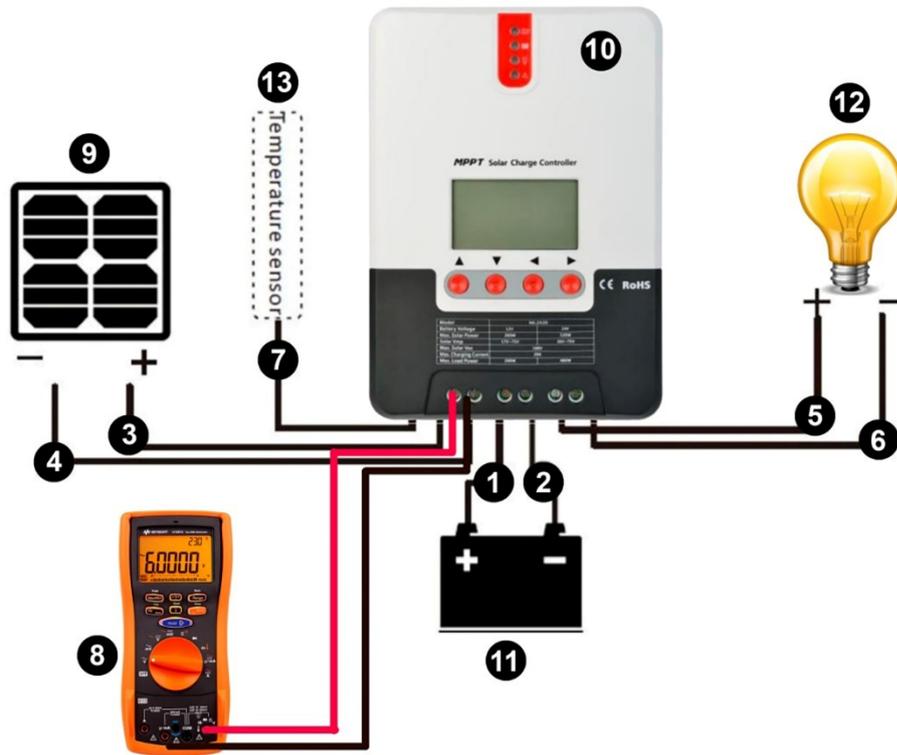


*Рис. 3.4. Установленная на наклонную подложку солнечная панель*



*Рис. 3.5. Фото экспериментальной установки*

На рисунке 3.6 представлена схема экспериментальной установки.



*Рис. 3.6. Схема экспериментальной установки*

Контроллер заряда (поз. 10 на рис. 3.6) DELTA SolarSeries серии MPPT2420 (перевод с англ. "Maximum Power Point Tracking" - слежение за точкой максимальной мощности) может следить за мощностью генерации солнечного модуля и отслеживать максимальные напряжения и ток в режиме реального

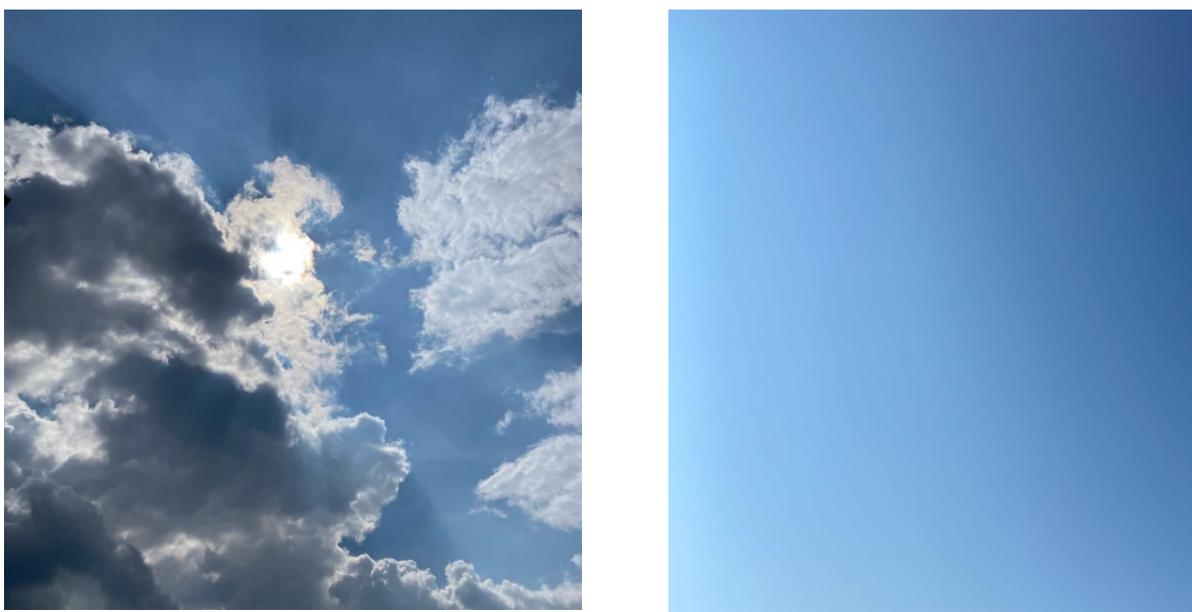
времени, что позволяет системе заряжать аккумулятор с максимальной мощностью. Благодаря технологии двухпикового или многопикового слежения контроллер отслеживает максимальную точку мощности, что позволяет повысить эффективность использования энергии фотоэлектрических систем [60].

К разъемам 3 и 4 подключена солнечная панель (поз.9) и мультиметр (поз.8), к разъемам 1 и 2 аккумулятор (поз.11) (14 В), к разъемам 5 и 6 – нагрузка (поз.12). К разъему 7 подключен внешний термодатчик (поз.13).

Были произведены измерения напряжений и тока для следующих случаев:

- без нагрузки (холостой ход);
- с лампой мощностью 5 Вт (12 В);
- с лампой мощностью 10 Вт (12 В);
- с лампой мощностью 20 Вт (12 В);
- с лампой мощностью 40 Вт (36 В).
- с лампой мощностью 100 Вт (12 В).

Измерения производились дважды: 26 июля при переменной облачности и 7 августа при ясном небе (рисунок 3.7).



*Рис. 3.7. Фотографии неба при проведении эксперимента  
26.07 (слева) и 07.08 (справа)*

При подключении к ФЭП нагрузки мощностью 100 Вт 26-го июля наблюдалось снижение заряда АКБ спустя 2-3 минуты после включения лампы. Суммарная солнечная радиация в период измерений с 12-00 до 13-00 составила 117,66 Вт/м<sup>2</sup>. При такой же нагрузке в 100 Вт 7-го августа заряд АКБ по истечении 10 минут измерений тока и напряжения остался равным 100%, но при этом в течении 2-х минут заряд АКБ опустился до 90%-95%. Суммарная солнечная радиация в период измерений с 11-00 до 12-00 составила 644,57 Вт/м<sup>2</sup>.

Рядом с экспериментальной установкой на участке установлена с той же ориентацией и углом наклона к горизонту солнечная панель на основе монокристаллического кремния мощностью 150 Вт, с номинальным выходным напряжением 12 В (рисунок 3.8). Паспортный КПД панели составляет 13%. В течение всего дня в период с 09-00 до 21-00 7-го августа производились замеры тока короткого замыкания  $I_{кз}$  (рисунок 3.9) и напряжение холостого хода  $U_{хх}$  (рисунок 3.10) для двух ФЭП на основе аморфного и монокристаллического кремния.



*Рис. 3.8. Фотография ФЭП на основе монокристаллического кремния мощностью 150 Вт*

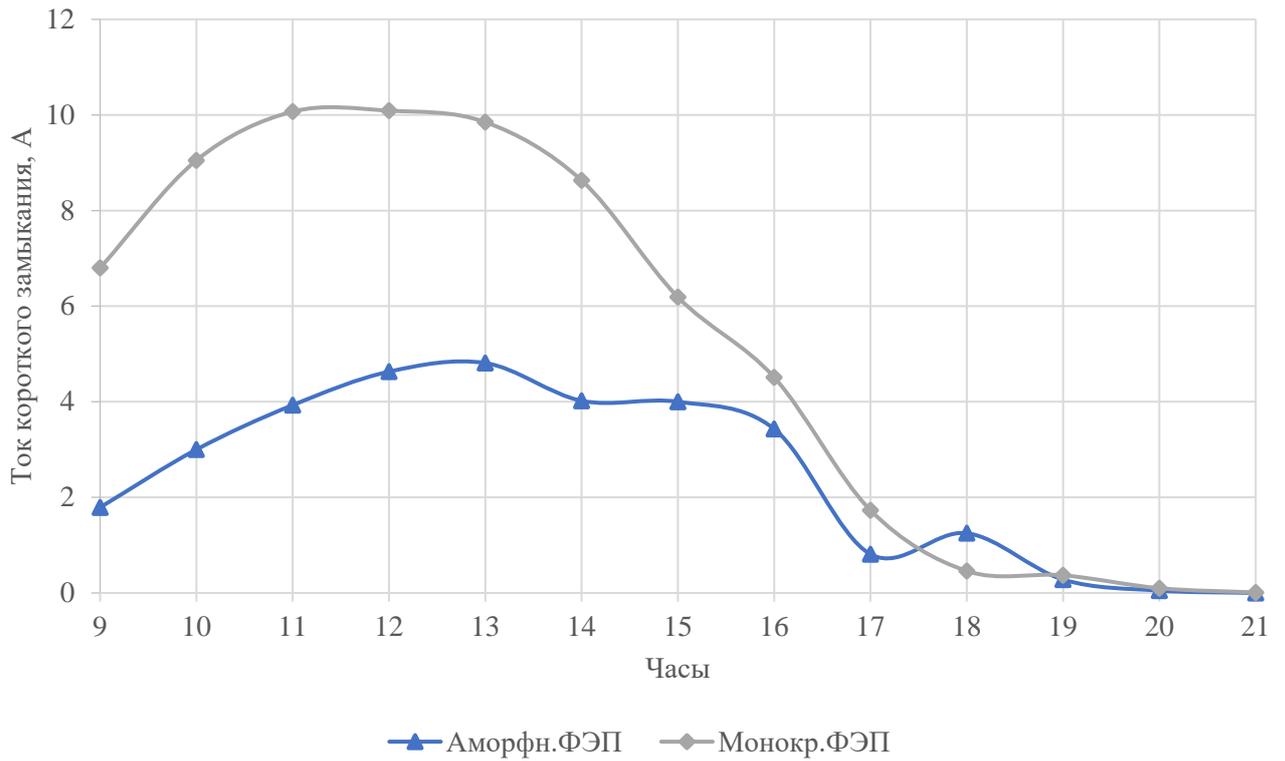


Рис. 3.9. График изменения тока короткого замыкания  $I_{кз}$  ФЭП на основе аморфного и монокристаллического кремния

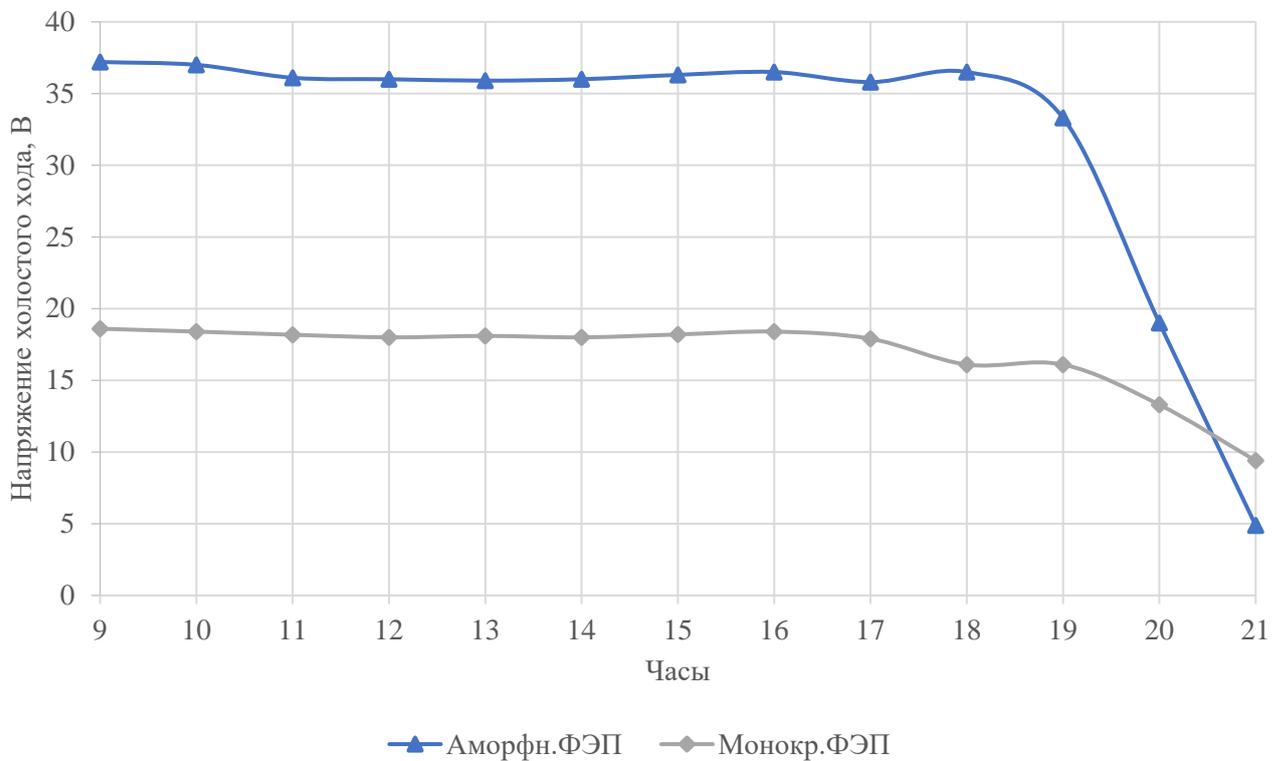


Рис. 3.10. График изменения напряжения холостого хода  $U_{хх}$  ФЭП на основе аморфного и монокристаллического кремния

На рисунке 3.11 изображен график изменения произведения тока короткого замыкания и напряжения холостого хода для двух типов панелей.

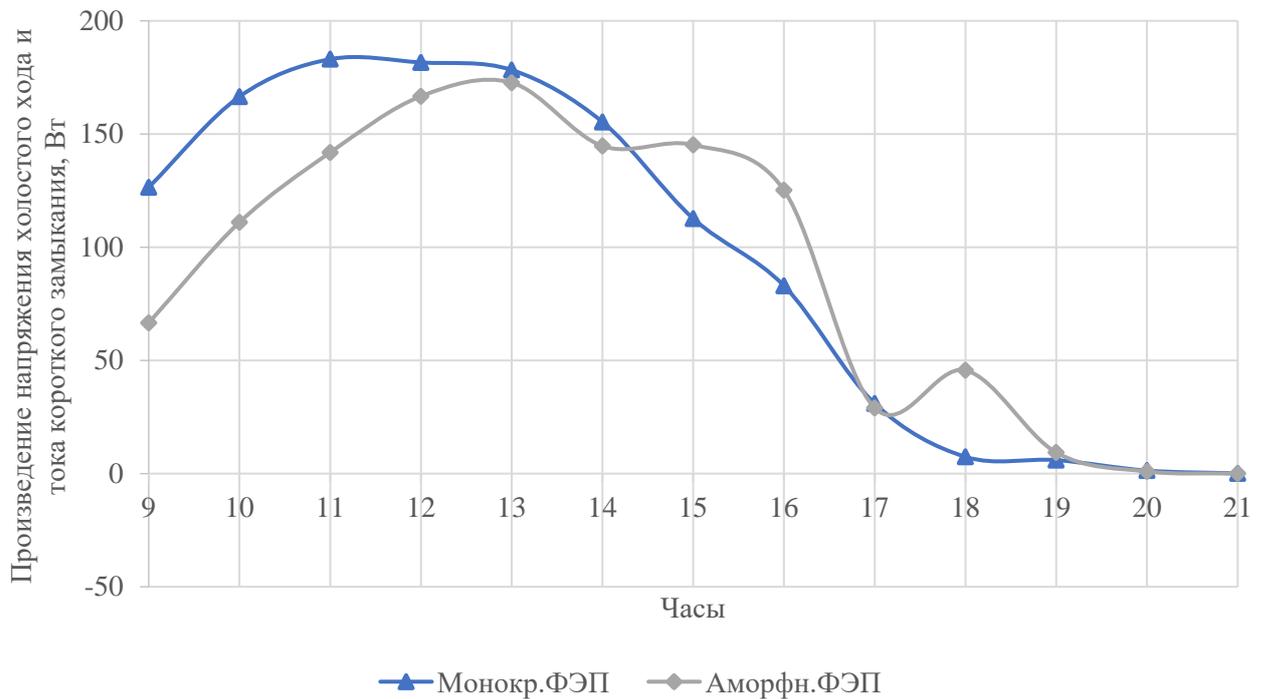


Рис. 3.11. График изменения произведения напряжения  $U_{xx}$  и тока короткого замыкания  $I_{кз}$  разных ФЭП

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 3.12).

$$\eta_{\text{аморфн}} = \frac{U_{xx} J_{кз}}{S_{\text{аморфн}} Q} \cdot 100\% = \frac{172,679}{1,95 \cdot 753,447} \cdot 100\% = 11,75\% \quad (3.1)$$

$$\eta_{\text{монокр}} = \frac{U_{xx} J_{кз}}{S_{\text{монокр}} Q} \cdot 100\% = \frac{183,073}{2,16 \cdot 753,447} \cdot 100\% = 11,25\% \quad (3.2)$$

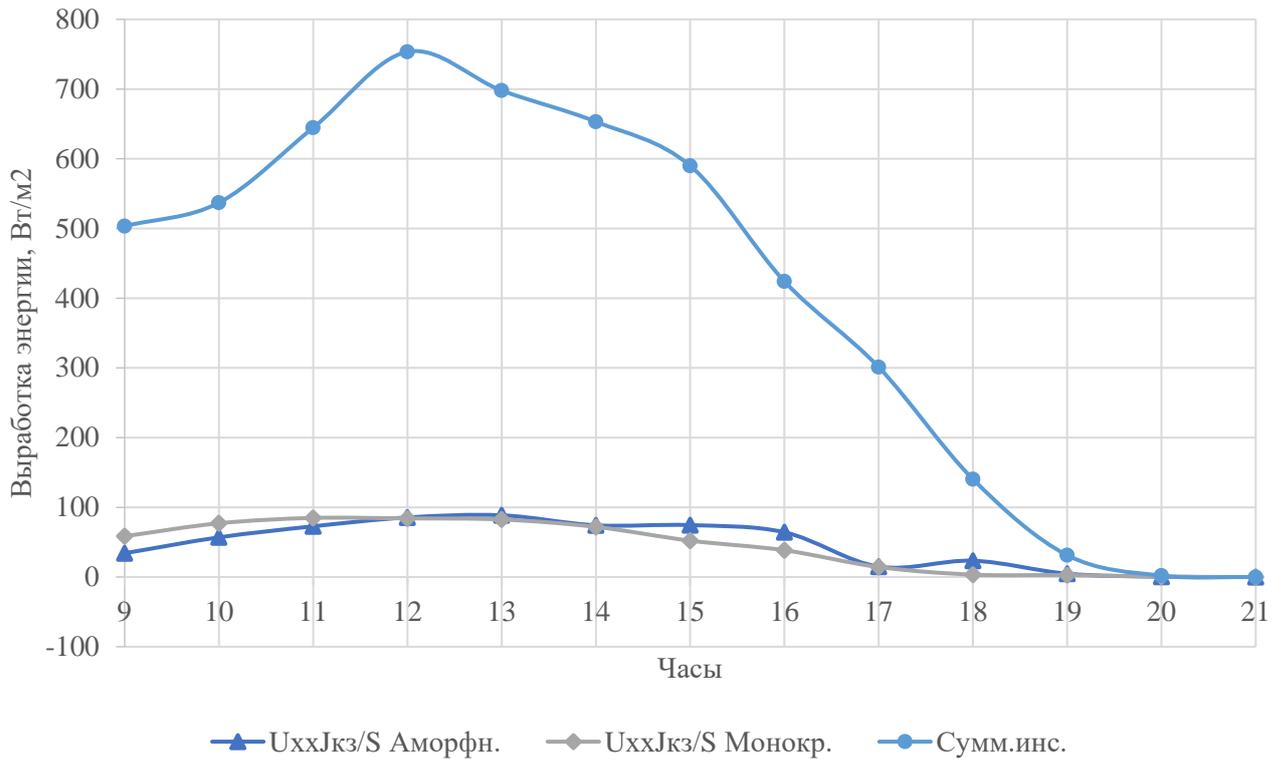


Рис. 3.12. Выработка энергии ФЭП на основе аморфного и монокристаллического кремния

Кривые изменения КПД в период с 11-00 до 15-00 для ФЭП на основе аморфного и монокристаллического кремния показаны на рисунке 4.13. Экспериментальные установки позволили проанализировать и сравнить ток короткого замыкания и напряжение холостого хода для разных ФЭП при изменении угла наклона к горизонту. На рисунке 3.14 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  $\frac{(U_{xx} J_{кз})_{\min}}{(U_{xx} J_{кз})_{\max}} = 0,57,$

– для монокристаллической  $\frac{(U_{xx} J_{кз})_{\min}}{(U_{xx} J_{кз})_{\max}} = 0,56.$

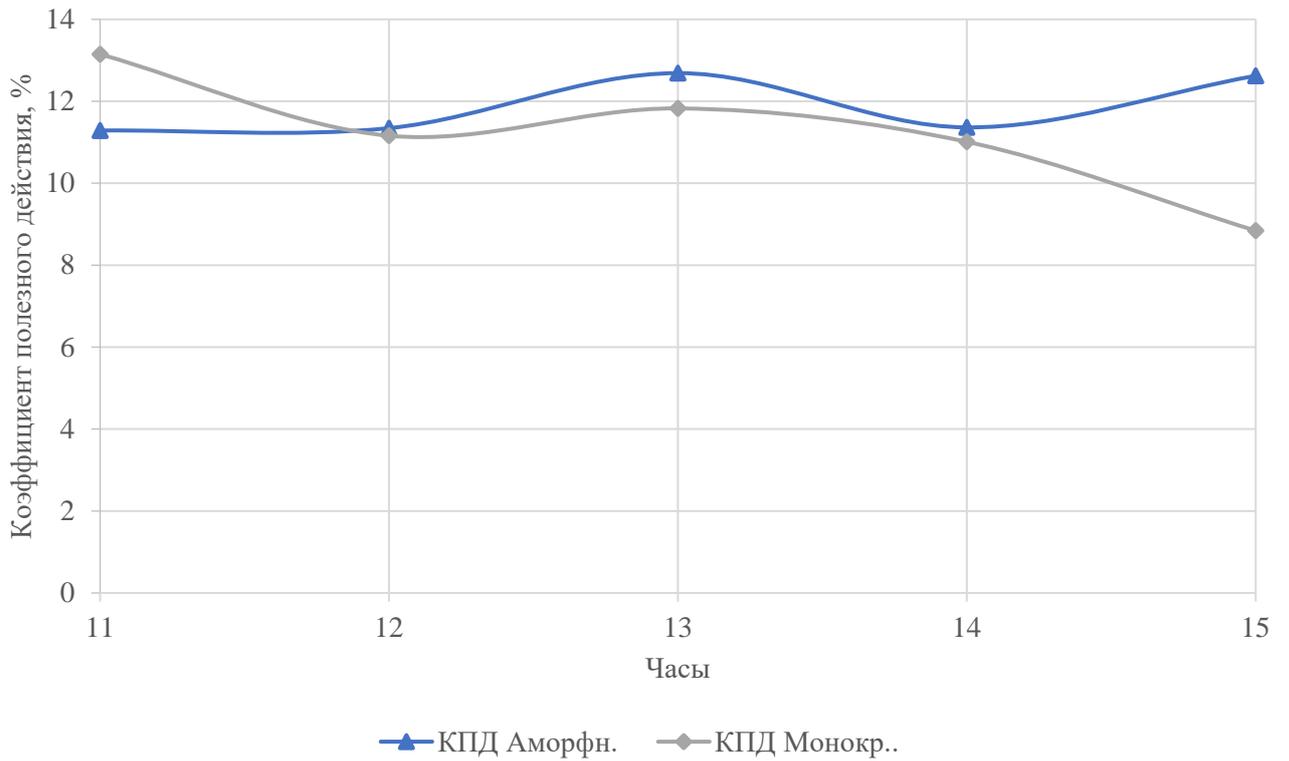


Рис. 3.13. График изменения КПД в период с 11-00 до 15-00 для ФЭП на основе аморфного и монокристаллического кремния

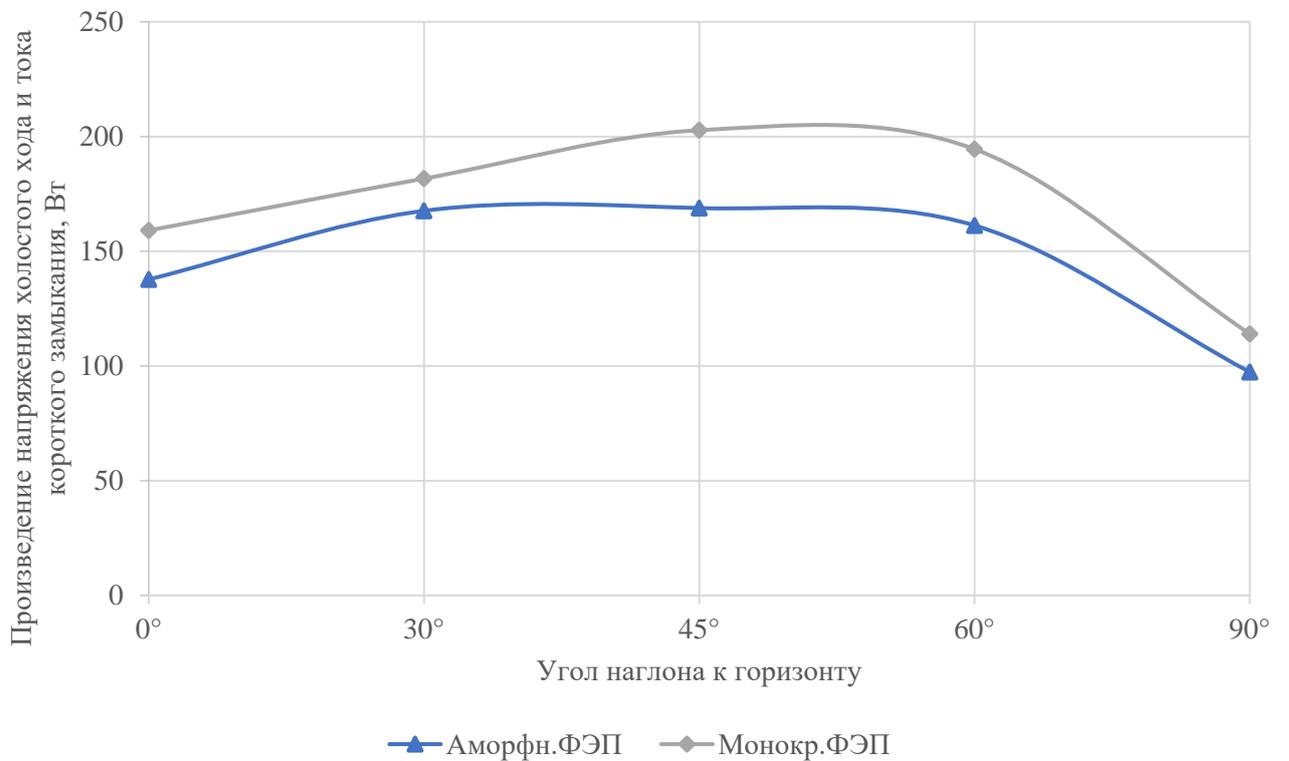


Рис. 3.14. График зависимости произведения напряжения  $U_{xx}$  и тока короткого замыкания  $I_{кз}$  разных ФЭП от угла наклона к горизонту

### 3.3 Выводы к главе 4

– Проведенный анализ энергетического потенциала солнечного фасада, интегрированного в здание 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.

– Проведен экспериментальный анализ изменения КПД панелей на основе аморфного и монокристаллического кремния при одинаковых условиях солнечной инсоляции, позволяющий сравнить энергетические характеристики ФЭП.

## Глава 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ И ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОСЛОЙНОЙ ФАСАДНОЙ ПАНЕЛИ ДЛЯ ЗДАНИЙ С КОМПЛЕКСОМ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

### 4.1 Методика и результаты прочностного расчета МФП

Расчет прочности МФП выполняется в программном комплексе ANSYS.

Расчет конструкции МФП по предельным состояниям 1-й и 2-ой группы выполняется с учетом неблагоприятных сочетаний нагрузок. Сочетания устанавливаются из анализа реальных вариантов одновременного действия различных нагрузок для рассматриваемой стадии работы панели [61]. Формула для определения основных сочетаний нагрузок, состоящих из постоянных, длительных и кратковременных, имеет вид

$$C_m = P_d + (\psi_{11}P_{11} + \psi_{12}P_{12} + \dots) + (\psi_{i1}P_{i1} + \psi_{i2}P_{i2} + \dots), \quad (4.1)$$

где  $P_d$  – постоянная нагрузка, равная весу панели при максимальных толщинах теплоизоляционных слоев и максимальной величине вентилируемого зазора;

$P_l$  – длительные нагрузки, к ним относятся воздействия, обусловленные изменением влажностного режима внешнего слоя теплоизоляции сэндвич-панели при нарушении целостности конструкции или герметичности узлов соединения;

$P_t$  – кратковременные нагрузки, к ним относятся климатические нагрузки. Также дополнительно задана горизонтальная нагрузка на панель со стороны помещения.

$\psi_l, \psi_t$  – коэффициенты сочетаний для длительных и кратковременных нагрузок, соответственно, приняты для оценки наиболее неблагоприятного сочетания равными

$$\psi_{l1} = 1,0; \psi_{r1} = 1,0; \psi_{r2} = 1,0. \quad (4.2)$$

Для навесных фасадных систем необходимо учитывать пиковые положительные и отрицательные воздействия ветровой нагрузки, нормативные значения которых определяются по формуле [61]

$$\omega_{+(-)} = \omega_0 k(z_e) [1 + \zeta(z_e)] c_{p,+(-)} V_{+(-)}, \quad (4.3)$$

где  $\omega_0$  – нормативное значение давление ветра, кПа;

$z_e$  – эквивалентная высота, м;

$k(z_e)$  и  $\zeta(z_e)$  – коэффициенты, учитывающие, соответственно, изменение давления и пульсаций давления ветра на высоте  $z_e$ ;

$c_{p,+(-)}$  – пиковые значения аэродинамических коэффициентов положительного давления (+) или отсоса (-);

$V_{+(-)}$  – коэффициенты корреляции ветровой нагрузки, соответствующие положительному давлению (+) и отсосу (-), зависят от площади ограждения, с которой собирается ветровая нагрузка.

В расчетной модели принят фрагмент фасада 3-х этажного здания,  $z_e = 11$  м. Принят тип местности В – городские территории, лесные массивы и другие местности, равномерно покрытые препятствиями высотой более 10 м.

В расчете принят II ветровой район (Свердловская область). Нормативные значения пиковой ветровой нагрузки приняты

$$\omega_+ = 0,46 \text{ кПа}, \omega_- = -0,841 \text{ кПа}. \quad (4.4)$$

Нормативные значения горизонтальных нагрузок на ограждения для зданий следует принимать 0,8 кН/м. Для расчета панели нагрузка на внутренней поверхности панели принята сосредоточенной, равная 1,15 кН, приложенной в центре внутренней поверхности панели.

Для расчетной модели приняты два варианта расчетных сочетаний нагрузок (таблица 4.1). Массы элементов панели приведены в таблице 4.2. Свойства материалов МФП представлены в таблице 4.3. Схема приложения нагрузок на панель изображена на рисунке 4.1.

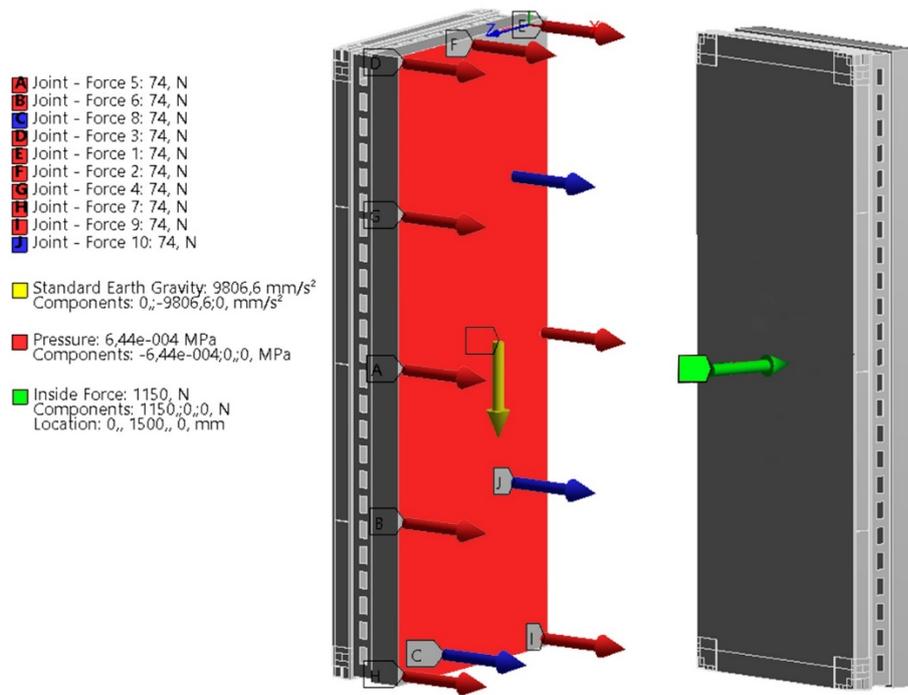


Рис. 4.1. Схема приложения нагрузок на МФП

Таблица 4.1

Два варианта неблагоприятных сочетаний нагрузок

	Постоянная нагрузка $P_d$ : собственный вес панели	Длительная нагрузка $P_l$ $\psi_{l1}=1,0$	Кратковременная нагрузка $P_{t1}$ : горизонтальная нагрузка на внутреннюю поверхность панели, $\psi_{t1}=1,0$	Кратковременная нагрузка $P_{t2}$ : пиковые значения ветровой нагрузки, $\psi_{t2}=1,0$
<b>1 вариант сочетания нагрузок</b>				
Нормативные значения нагрузок		Плотность теплоизоляции в расчете задана 140 кг/м <sup>3</sup> с учетом водопоглощения (не более 3 кг/м <sup>2</sup> )	0,8 кН/м x 1,2м = 0,96 кН	$\omega^+ = 0,46$ кПа
Коэффициенты надежности $\gamma_f$ по нагрузке	$\gamma_f = 1,05$ для металлических конструкций		$\gamma_f = 1,2$	$\gamma_f = 1,4$
Расчетные значения нагрузок	313,032 кг		0,96кНx1,2 = 1,15 кН	0,46кПа x 1,4 = 0,644 кПа
<b>2 вариант сочетания нагрузок</b>				
Нормативные значения нагрузок		Плотность теплоизоляции в расчете задана 140 кг/м <sup>3</sup> с учетом водопоглощения (не более 3 кг/м <sup>2</sup> )	0,8 кН/м x 1,2м = 0,96 кН	$\omega^- = -0,841$ кПа
Коэффициенты надежности $\gamma_f$ по нагрузке	$\gamma_f = 1,05$ для металлических конструкций		$\gamma_f = 1,2$	$\gamma_f = 1,4$
Расчетные значения нагрузок	313,032 кг		0,96кНx1,2 = 1,15 кН	-0,841кПа x 1,4 = -1,177 кПа

Масса элементов МФП

Элемент/слой	Количество, шт.	Объем, м <sup>3</sup>	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Масса, кг
aquapanel_s1 (Аквапанель, слой 1)	1	0,04478	1200	53,736
thermal_insulation_s2 (теплоизоляция внутренняя, слой 2)	1	0,28287	140	39,602
aquapanel_s3 (Аквапанель, слой 3)	1	0,04479	1200	53,748
thermal_profiles (Термопрофили)	1	0,00358	7850	28,103
mounting_element (Крепежные элементы)	4	0,00016	7850	5,024
perforated_frame_s4 (Каркас из перфорированных швеллеров, слой 4, в массу учтены саморезы для крепления сэндвич-панели)	1	0,00475	7850	37,288
aluminum_panel_s5 (Алюминиевый лист, слой 5)	1	0,00360	2770	9,972
thermal_insulation_s6 (Теплоизоляция внешняя, слой 6)	1	0,53991	140	75,587
aluminum_panel_s7 (Алюминиевый лист, слой 7)	1	0,00360	2770	9,972
Итого:				313,032

Свойства материалов слоев МФП

Характеристика, Ед.изм.	Алюминий (сплав ENAW- 3005H46)	Теплоизоляция – негорючие плиты из каменной ваты для сэндвич- панелей	Сталь 08 ПС ХП (Каркас из швеллера ГОСТ 8240, крепежные элементы панели, каркас из термопрофилей)	Цементная влагостойк ая плита
Предел прочности $\sigma_b$ , МПа	185-240 (20°C)		290	10
Предел текучести $\sigma_T$ , МПа	160-210 (20°C)		175	
Модуль упругости, Е, МПа	69 500	XY 5,6 YZ 5,6 XZ 5,6	2,06e+5	4 000
Коэффициент Пуассона	0,33	XY 0,2 YZ 0,2 XZ 0,2	0,3	0,1
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	2 770	140 (в расчете с учетом водопоглощения) 105 (минимальная плотность в соответствии с ГОСТ 32603-2012)	7850	1200
Модуль объемной упругости, МПа	68 137		1,7167e+5	1 666,7
Модуль сдвига, МПа	26 128	XY 2,5 YZ 2,5 XZ 2,5	79231	1 818,2
Изотропный коэффициент теплового расширения, 1/°C	2,3e-5	0	1,2e-5	9,33e-6
Водопоглощение при частичном погружении образца в течение заданного длительного времени, кг/м <sup>2</sup>		Не более 3		

Модель панели в SOLIDWORKS разработана с некоторыми допущениями:

- Термопрофили приняты швеллерами сплошного сечения (без перфораций);
- Внешний слой панели (сэндвич-панель) смоделирован без учета соединительных пазов (замка Z-lock);
- Винты для крепления внешнего слоя панели к несущему каркасу смоделированы без резьбы, шляпки, шайбы. Шайба задана отпечатком на наружной поверхности алюминиевого листа (диаметром 28 мм);
- Все стальные элементы смоделированы без радиусов гиба с углами 90°;
- Самонарезающие винты для крепления цементных плит к каркасу из термопрофиля и крепежным элементам и саморезы, соединяющие каркас из термопрофилей с крепежными элементами, заданы точками пересечения эскизных кромок (для моделирования указанных связей в ANSYS).

В модели были назначены следующие контактные взаимодействия:

- Между цементными плитами и стальными элементами (каркасом из перфорированных швеллеров, крепежными элементами и термопрофилями) взаимодействие задано контактом типа “Frictional” (фрикционный) с коэффициентом трения (friction coefficient) равным 0,45;
- Взаимодействие стальных элементов между собой (каркаса из перфорированных швеллеров, крепежных элементами и термопрофилей) задано контактом типа “Frictional” (фрикционный) с коэффициентом трения (friction coefficient) равным 0,15;
- Взаимодействие между теплоизоляцией и стальными элементами задано контактом типа “Frictional” (фрикционный) с коэффициентом трения (friction coefficient) равным 0,4;
- Самонарезающие винты для крепления цементных плит к термопрофилям и крепежным элементам, а также для крепления термопрофилей к крепежным элементам заданы точечными контактами “Weld”;

– Взаимодействия между теплоизоляцией и цементными плитами, теплоизоляцией и термопрофилями, соединенных между собой клеевым составом, заданы контактом “Bonded”;

– Сварной шов между крепежными элементами и каркасом из перфорированных швеллеров задан контактом “Bonded”;

– Взаимодействие между алюминиевым листом сэндвич-панели и каркасом из перфорированных швеллеров задано контактом типа “Frictional” (фрикционный) с коэффициентом трения (friction coefficient) равным 0,5;

– Винты для крепления сэндвич-панели к каркасу из перфорированных швеллеров заданы контактом “Joints” (шарниры), тип “Cylindrical” с типом связи “Body- Body”.

Изначально фиксацию сэндвич-панели к несущему каркасу предполагалось осуществить с помощью 6 винтов. Максимальные перемещения составили более 5 мм (рисунок 4.2), что допустимо для данной высоты конструкции, но максимальные напряжения в алюминиевом листе при втором варианте сочетания нагрузок в области шайб значительно превышали предел текучести (рисунок 4.3).

**F: Copy of Preload**

Total Deformation

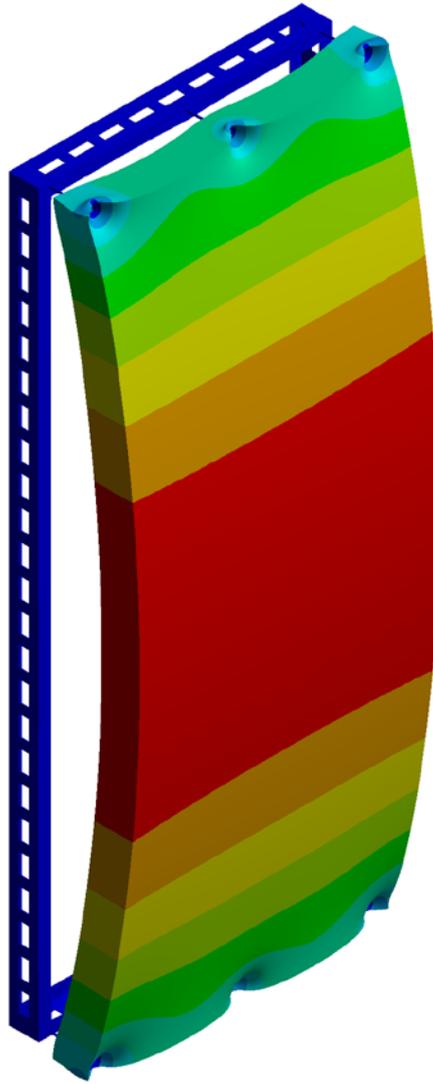
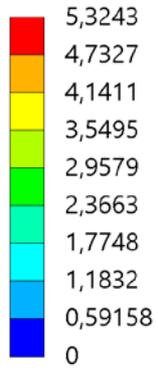
Type: Total Deformation

Unit: mm

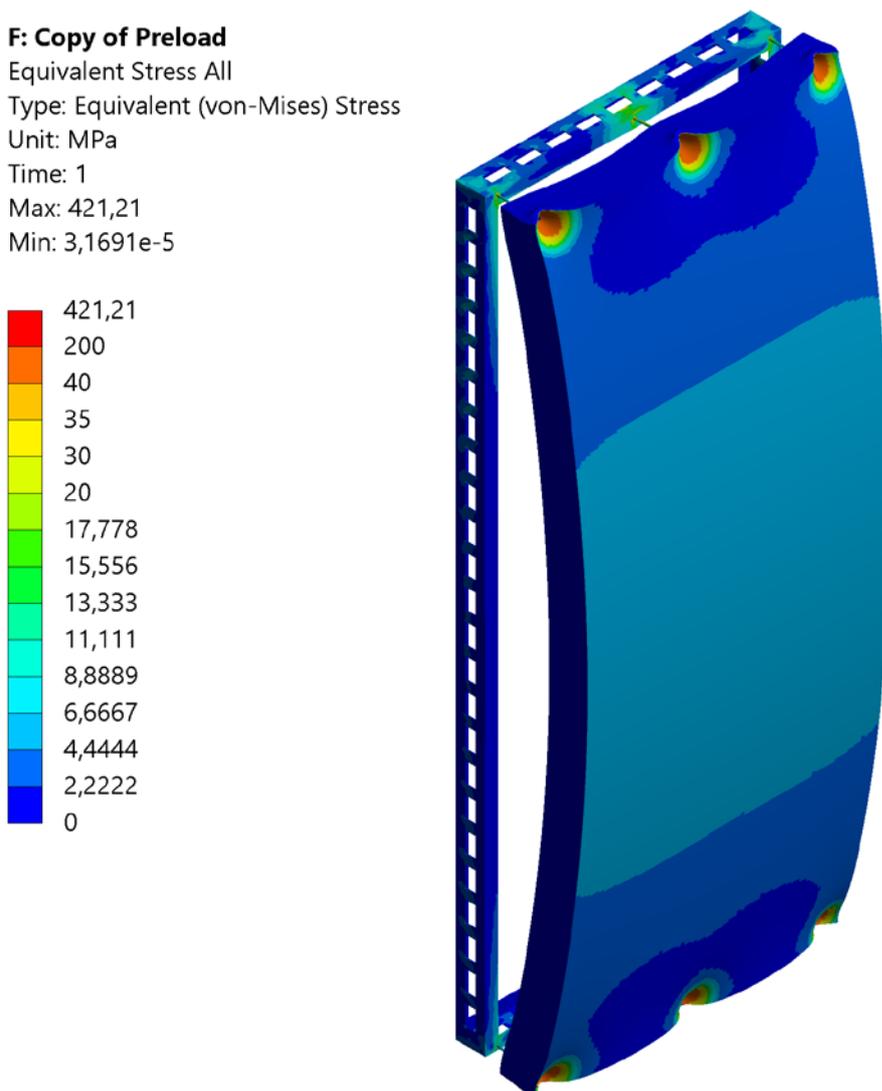
Time: 1

Max: 5,3243

Min: 0



*Рис. 4.2. Деформации наружного слоя (сэндвич-панели) МФП с креплением с помощью 6 винтов*



*Рис. 4.3. Напряжения в наружном слое (сэндвич-панели) МФП с креплением с помощью 6 винтов*

Был проведен тестовый итерационный расчет для определения необходимого количества крепежных элементов и диаметра шайбы. Расчетом было установлено требуемое количество и расположение саморезов.

Предварительное натяжение винта задавалось с помощью перемещения (-0,2 мм). Для обеспечения корректности расчета в части возможности отрыва алюминиевого листа от головки винта при сжатии сэндвич-панели, граничные условия перемещения в шарнире Cylindrical заменены на соответствующим им силы, определенные отдельным расчетом для всех шарниров, результаты которого приведены в таблице 4.4. Максимальное значение осевой силы

составляет 73,9 Н. В дальнейшем расчете было принято максимальное значение осевой силы 74 Н для всех соединений. Нумерация шарниров изображена на рисунке 4.4.

Таблица 4.4

*Значения осевых сил, вызванных предварительным натяжением  
винтового соединения -0,2 мм*

Номер шарнира	Осевая сила в соединении, Н
1	64,4
2	72,7
3	64,6
4	72,5
5	73,1
6	73,7
7	64,5
8	73,4
9	64,7
10	73,9
11	73,0
12	72,5

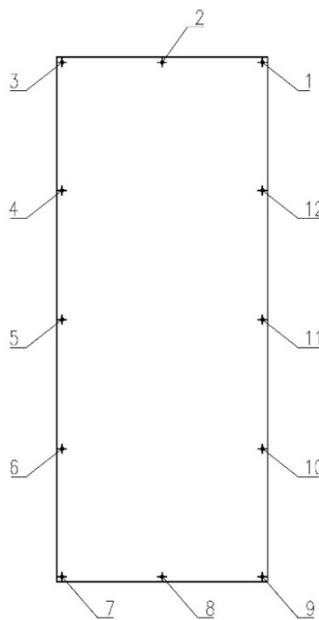


Рис. 4.4. Нумерация саморезов МФП (вид с фасада)

Фиксация расчетной модели осуществлялась с использованием шарниров “Joint”, тип “General” с типом связи “Body-Ground”. Связь нижнего левого крепежного элемента с опорным элементом осуществлена тремя отдельными шарнирами, каждый из которых связан с соответствующей контрольной поверхностью крепежного элемента, при этом каждый шарнир обеспечивает фиксацию одной степени свободы перемещения; степени свободы поворота во всех случаях разрешены [62].

Связь нижнего правого крепежного элемента с опорным элементом осуществлена двумя отдельными шарнирами, каждый из которых связан с соответствующей контрольной поверхностью крепежного элемента, при этом каждый шарнир обеспечивает фиксацию одной степени свободы перемещения (степень свободы перемещения вдоль оси Z разрешена); степени свободы поворота во всех случаях разрешены.

Связь верхнего левого крепежного элемента с опорным элементом осуществлена одним шарниром, ограничивающим степень перемещения вдоль оси X; степени свободы поворота разрешены. Связь верхнего правого крепежного элемента с опорным элементом задана аналогично.

Сетка модели выполнена трехмерной с элементами в форме тетраэдров (Tetrahedrons) и параллелепипедов (Quad/Tri). Минимальный размер элемента составляет 1,0 мм, максимальный размер – 60,0 мм. Общее количество узлов сетки модели МФП – 2 264 453 (Nodes), элементов – 624 344 (Elements).

Максимальные напряжения в панели получены для варианта сочетания нагрузок №2. На рисунке 4.5 представлено распределение напряжений панели для данного расчетного случая.

На рисунке 4.6 показаны концентраторы напряжений, возникающие в наружном алюминиевом слое вокруг шайб саморезов, что приводит к появлению напряжений, превышающих расчетное сопротивление алюминиевого сплава по пределу текучести

$$\sigma_{\max} = 171,88 \text{ МПа} > R_y = 160 \text{ МПа} . \quad (4.5)$$

Для предотвращения возникновения концентраторов напряжений необходима установка ЭПДМ-прокладок.

Прогибы панели не превосходят предельных деформаций при расчетных значениях нагрузок с учетом коэффициента надежности по нагрузке  $\gamma_f$  (рисунок 4.7). Предельные перемещения стен  $f_u$ , выполненных из панелей, в пределах одного этажа многоэтажных зданий с податливым креплением панели к каркасу здания должны быть не более

$$f_u = \frac{h_s}{300}, \quad (4.7)$$

где  $h_s$  – высота этажа в зданиях, равная высоте панели, мм.

В случае МФП предельные перемещения должны быть

$$f_u = \frac{3000}{300} = 10 \text{ мм}. \quad (4.8)$$

Максимальные перемещения в МФП

$$f = 2,42 \text{ мм} \leq f_u = 10 \text{ мм}. \quad (4.9)$$

Так как максимальные перемещения в панели менее предельных, расчет на прогибы и деформации панели по нормативным нагрузкам не производился. На рисунках 4.8-4.16 представлены поля распределения напряжений панели в отдельных элементах панели.

Полученные максимальные напряжения в несущих стальных элементах сравниваются с расчетными сопротивлениями по пределу текучести

$$\sigma_{\max} \leq R_y, R_y = R_{yn} / \gamma_m. \quad (4.10)$$

Расчетные сопротивления для гнутых профилей при растяжении, сжатии, изгибе приняты в соответствии с [63]. Коэффициент надежности по материалу для проката и гнутых профилей при статистической процедуре контроля его свойств принят

$$\gamma_m = 1,025. \quad (4.11)$$

Полученные максимальные значения напряжений в стальных элементах МФП меньше расчетного сопротивления по пределу текучести

$$\sigma_{\max} = 144,53 \text{ МПа} \leq R_y = 175 \text{ МПа} / 1,025 = 170 \text{ МПа}. \quad (4.12)$$

Для варианта сочетания нагрузок №1 максимальные напряжения составляют 38,86 МПа, максимальные перемещения составляют 0,48 мм.

Распределение напряжений панели представлено на рисунке 4.15, деформации панели показаны на рисунке 4.16 [64].

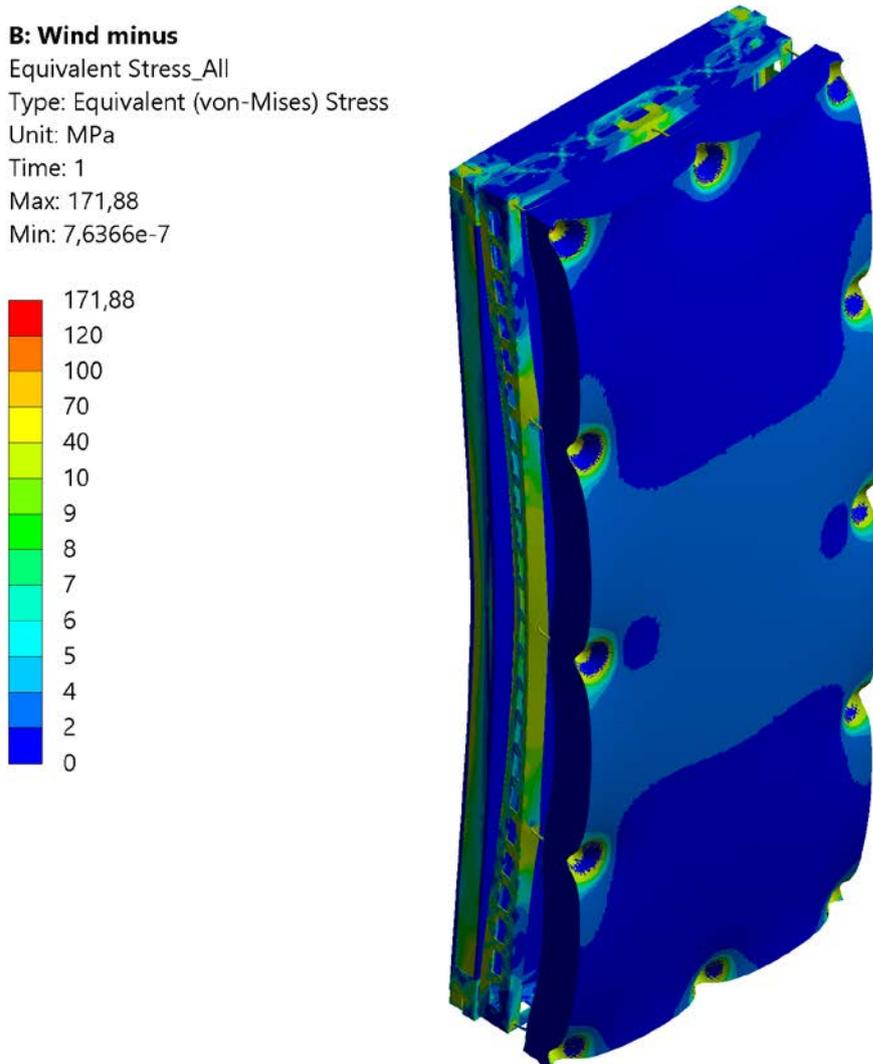


Рис. 4.5. Распределение напряжений в МФП для сочетания нагрузок №2

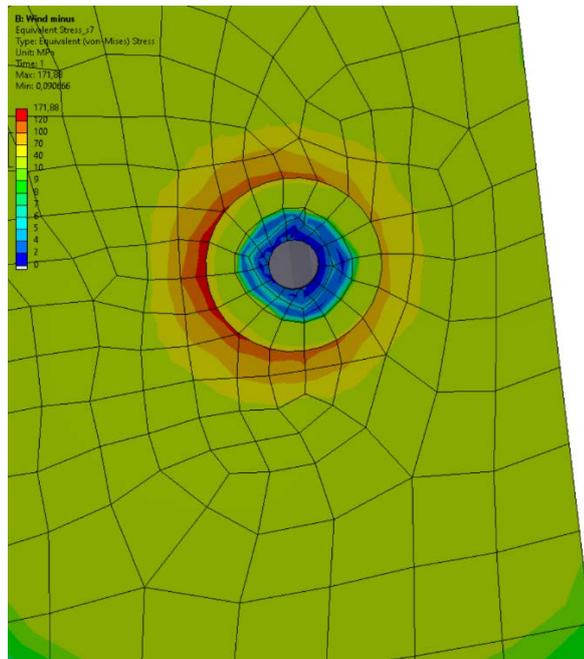


Рис. 4.6. Распределение напряжений в области шайбы самореза в наружном алюминиевом листе МФП (слой 7) для сочетания нагрузок №2

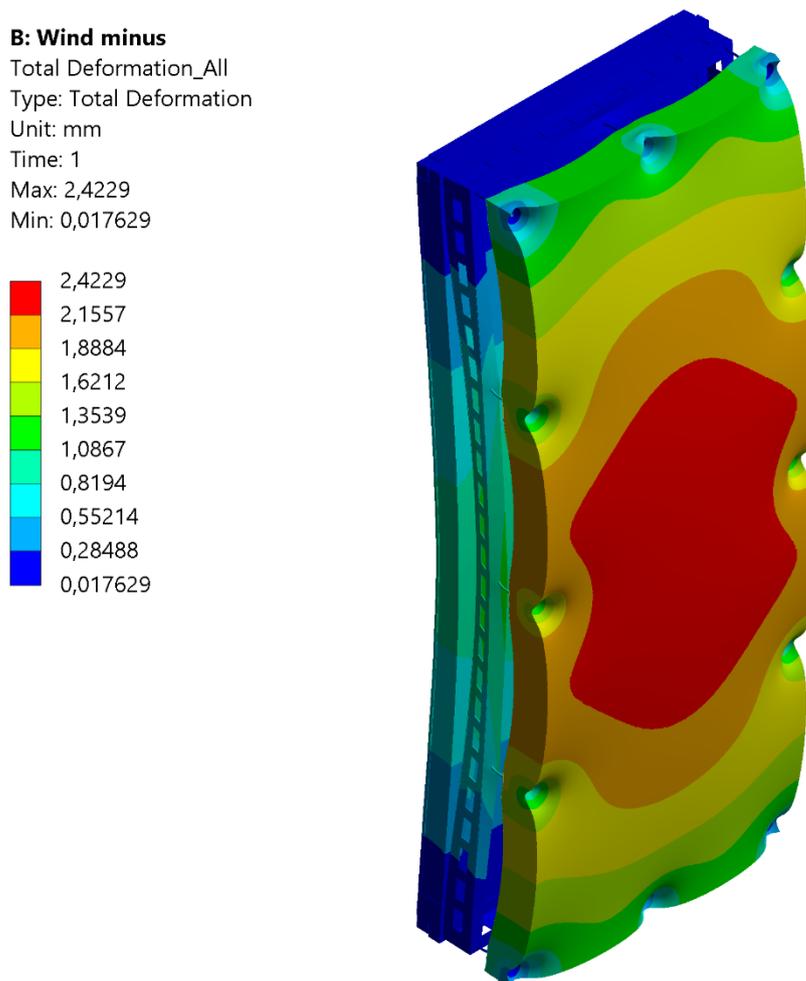


Рис. 4.7. Деформации в МФП для сочетания нагрузок №2

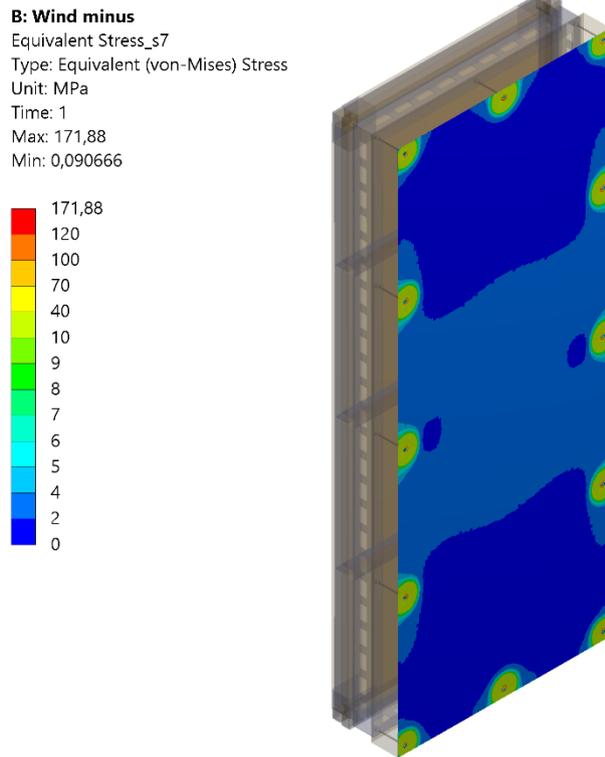


Рис. 4.8. Распределение напряжений в наружном алюминиевом листе МФП (слой 7) для сочетания нагрузок №2 ( $\sigma_{max} = 171,88$  МПа)

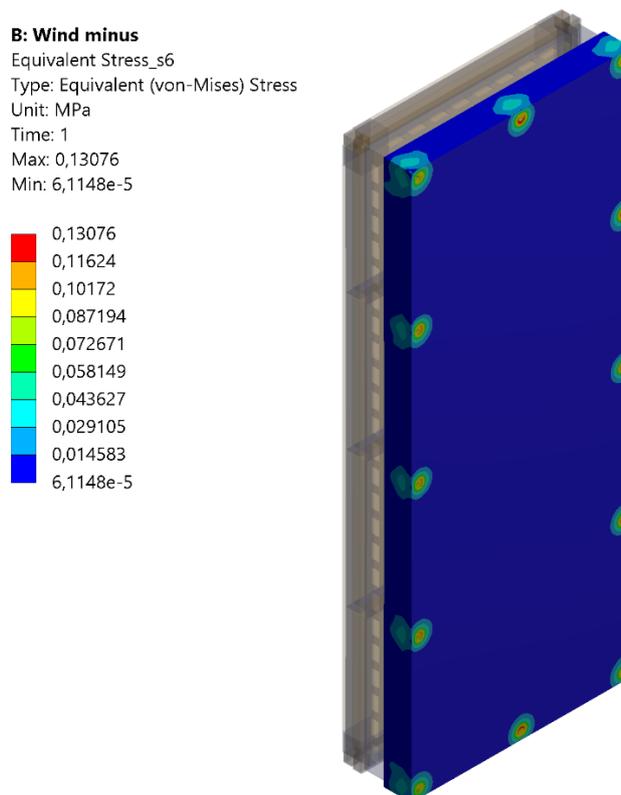
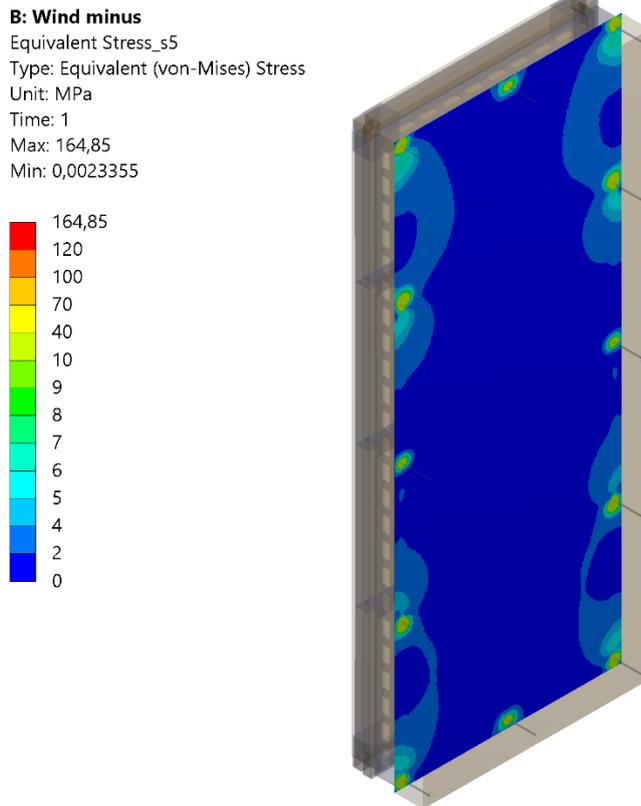
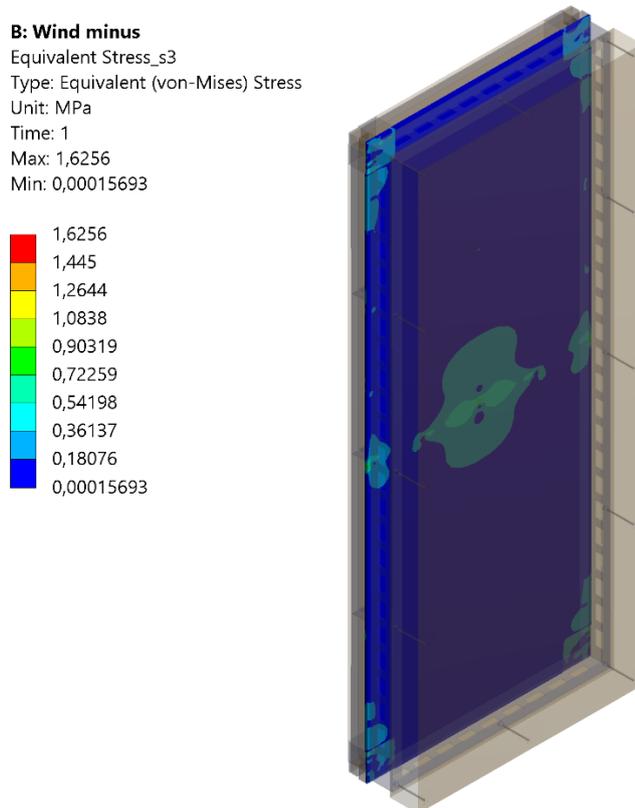


Рис. 4.9. Распределение напряжений в наружной теплоизоляции МФП (слой 6) для сочетания нагрузок №2 ( $\sigma_{max} = 0,13$  МПа)

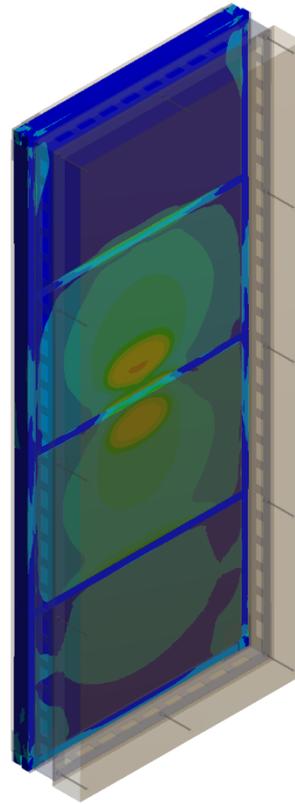
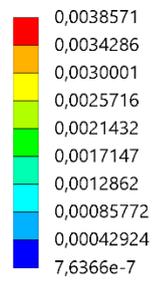


*Рис. 4.10. Распределение напряжений во внутреннем алюминиевом листе МФП (слой 5) для сочетания нагрузок №2 ( $\sigma_{max} = 164,85$  МПа)*



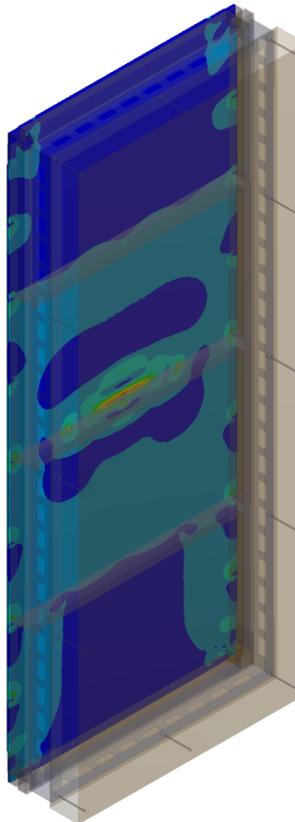
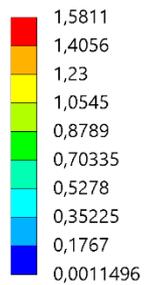
*Рис. 4.11. Распределение напряжений в цементной плите МФП (слой 3) для сочетания нагрузок №2 ( $\sigma_{max} = 1,63$  МПа)*

**B: Wind minus**  
 Equivalent Stress\_s2  
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
 Unit: MPa  
 Time: 1  
 Max: 0,0038571  
 Min: 7,6366e-7



*Рис. 4.12. Распределение напряжений во внутренней теплоизоляции МФП (слой 2) для сочетания нагрузок №2 ( $\sigma_{max}=0,004$  МПа)*

**B: Wind minus**  
 Equivalent Stress\_s1  
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
 Unit: MPa  
 Time: 1  
 Max: 1,5811  
 Min: 0,0011496



*Рис. 4.13. Распределение напряжений в цементной плите МФП (слой 1) для сочетания нагрузок №2 ( $\sigma_{max}=1,63$  МПа)*

**B: Wind minus**  
 Equivalent Stress\_tp  
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
 Unit: MPa  
 Time: 1  
 Max: 25,443  
 Min: 0,018178

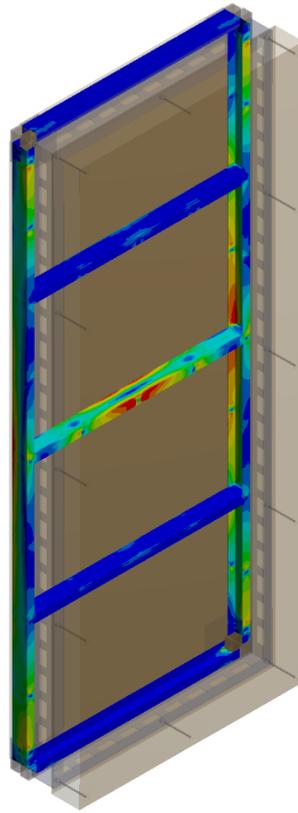
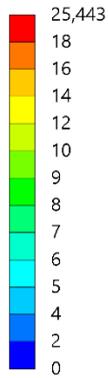


Рис. 4.14. Распределение напряжений в каркасе из термопрофилей МФП для сочетания нагрузок №2 ( $\sigma_{max} = 25,44$  МПа)

**B: Wind minus**  
 Equivalent Stress\_me  
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
 Unit: MPa  
 Time: 1  
 Max: 49,953  
 Min: 0,010402

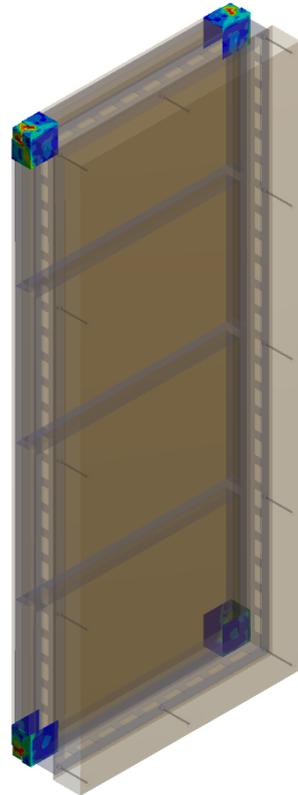
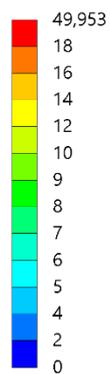
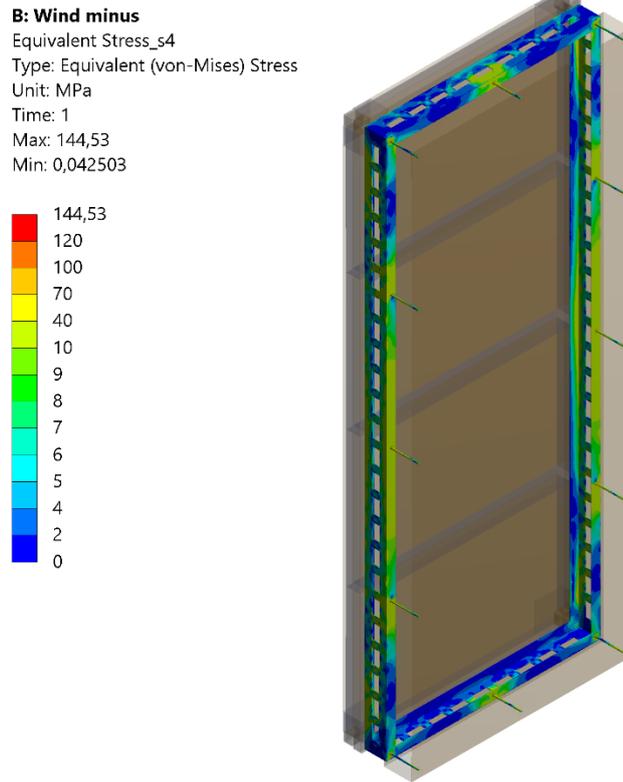
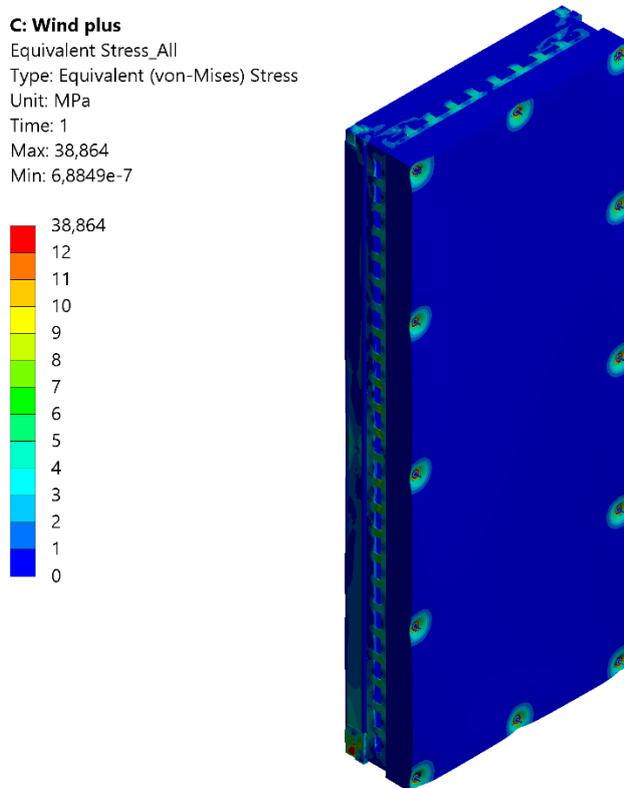


Рис. 4.15. Распределение напряжений в крепежных элементах МФП для сочетания нагрузок №2 ( $\sigma_{max} = 49,95$  МПа)

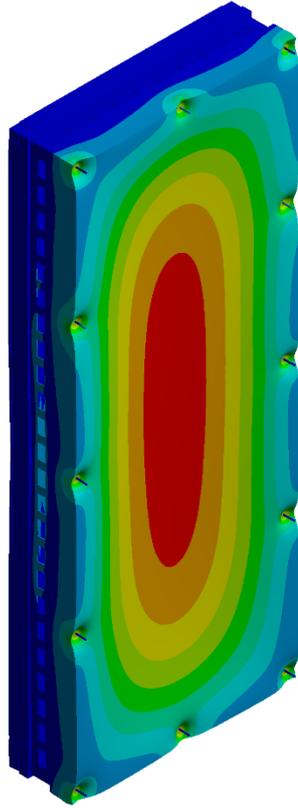
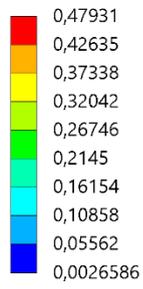


*Рис. 4.16. Распределение напряжений в несущем каркасе из перфорированных профилей для сочетания нагрузок №2 ( $\sigma_{max} = 144,53$  МПа)*



*Рис. 4.17. Распределение напряжений в МФП для сочетания нагрузок №1 ( $\sigma_{max} = 38,86$  МПа)*

**C: Wind plus**  
Total Deformation\_All  
Type: Total Deformation  
Unit: mm  
Time: 1  
Max: 0,47931  
Min: 0,0026586



*Рис. 4.18. Деформации в МФП для сочетания нагрузок №1*

## 4.2 Методика и результаты теплотехнического расчета МФП

Теплотехнический расчет и подбор оптимальных параметров МФП выполнялись в программном комплексе ANSYS.

Апробация методики проводилась на примере трехэтажного жилого здания, расположенного в Екатеринбурге.

### 4.2.1 Задание параметров здания

Габариты здания в плане в осях – 18x24 м. На рисунках 4.19 и 4.20 представлены планы первого и типового этажа соответственно.

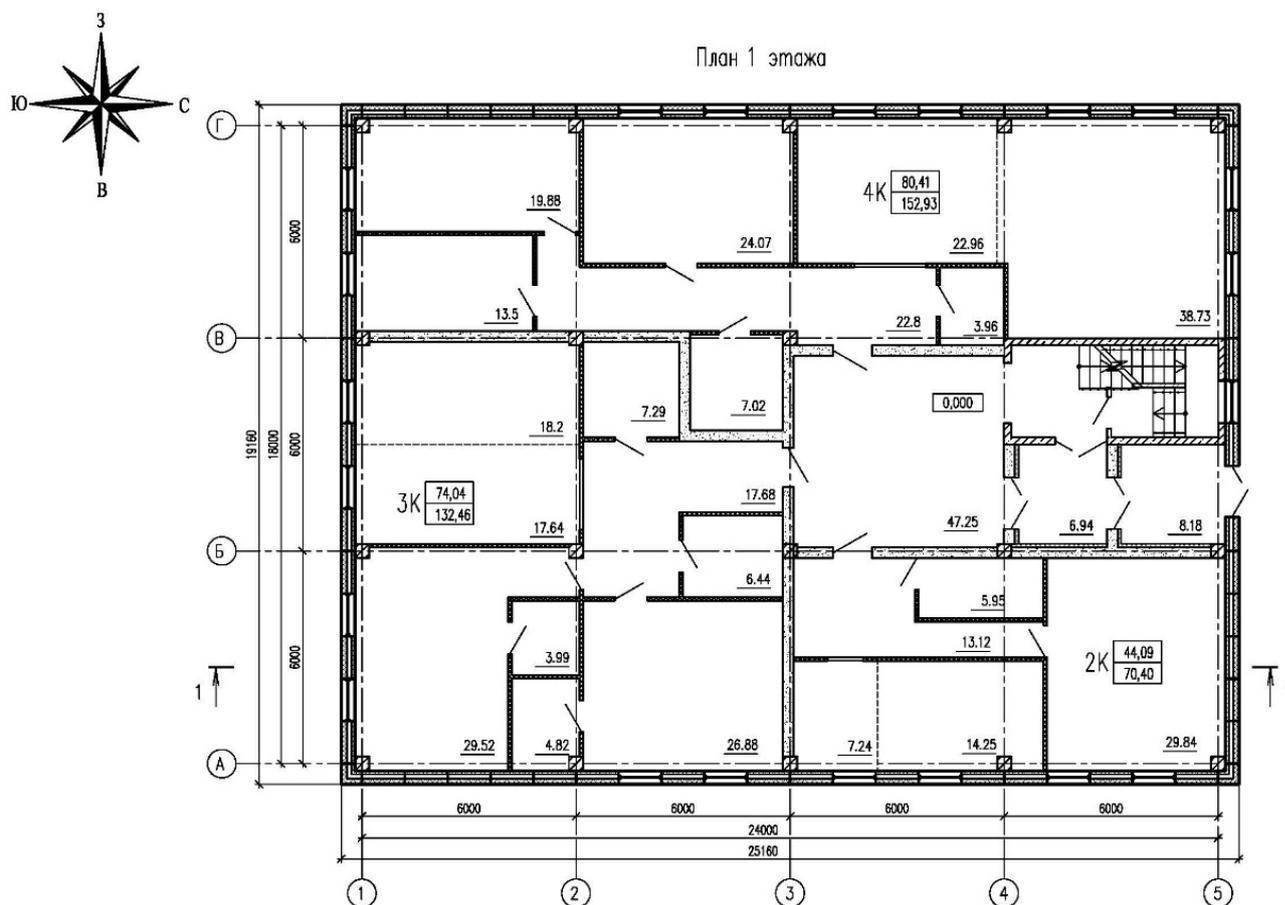


Рис. 4.19. План 1 этажа

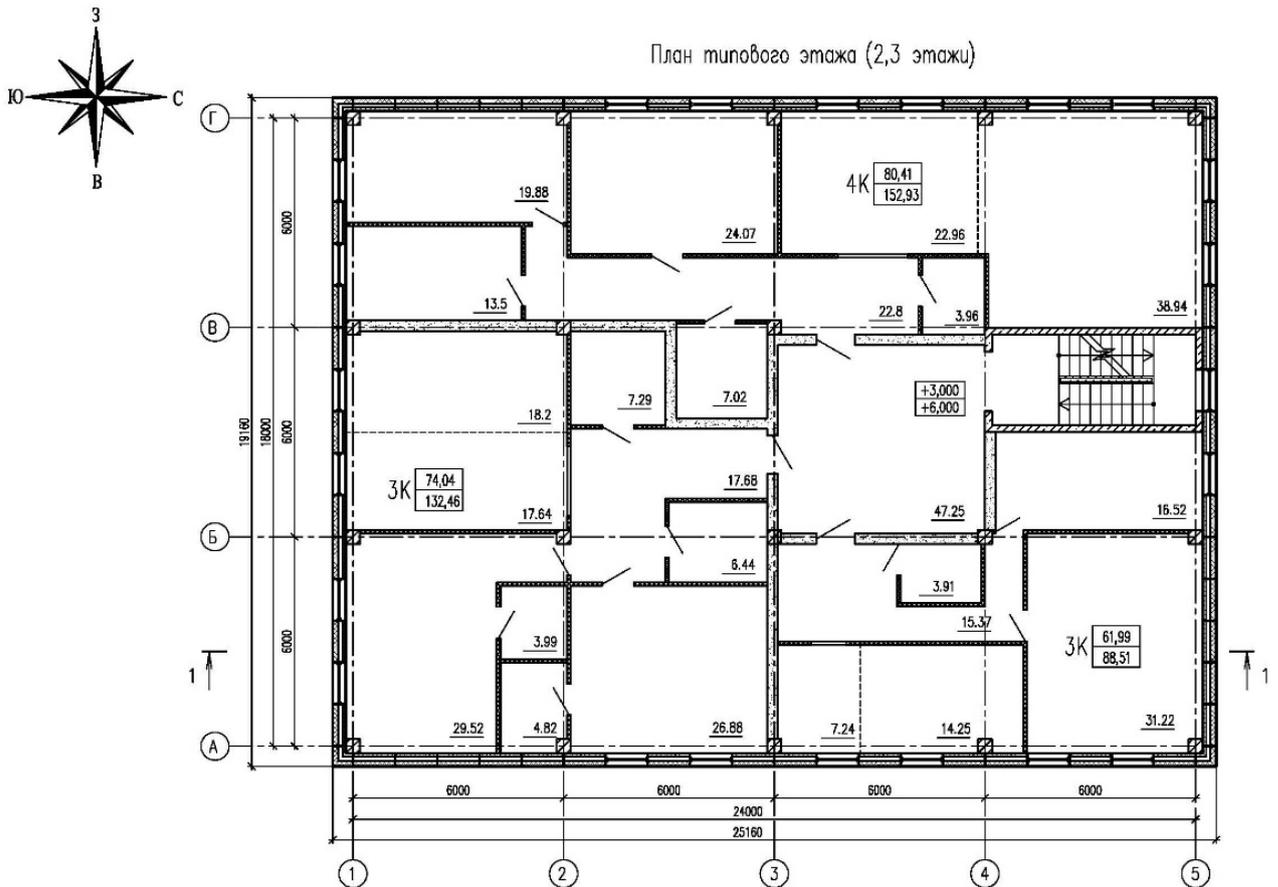


Рис. 4.20. План типового этажа

На разрезе 1-1 (рисунок 4.21) показана схема работы системы вентиляции здания. С улицы происходит забор холодного воздуха, далее этот воздух проходит через грунтовый теплообменник; отсюда подогретый грунтом воздух поступает в приточно-вытяжную вентиляционную установку с рекуперацией тепла и встроенным тепловым насосом, где происходит догрев приточного воздуха до необходимой температуры (20-22 °С). Вытяжной воздух из помещений сначала проходит через вентиляционную установку с рекуперацией тепла, далее поступает в конденсационный осушитель, после которого с незначительным повышением температуры (на 4-5 °С) поступает в распределительный лоток внизу вентилируемого зазора МФП. Выброс вытяжного воздуха из вентилируемого зазора происходит в парапетной части панели. По южному фасаду в осях Г-А установлены тонкопленочные ФЭП.

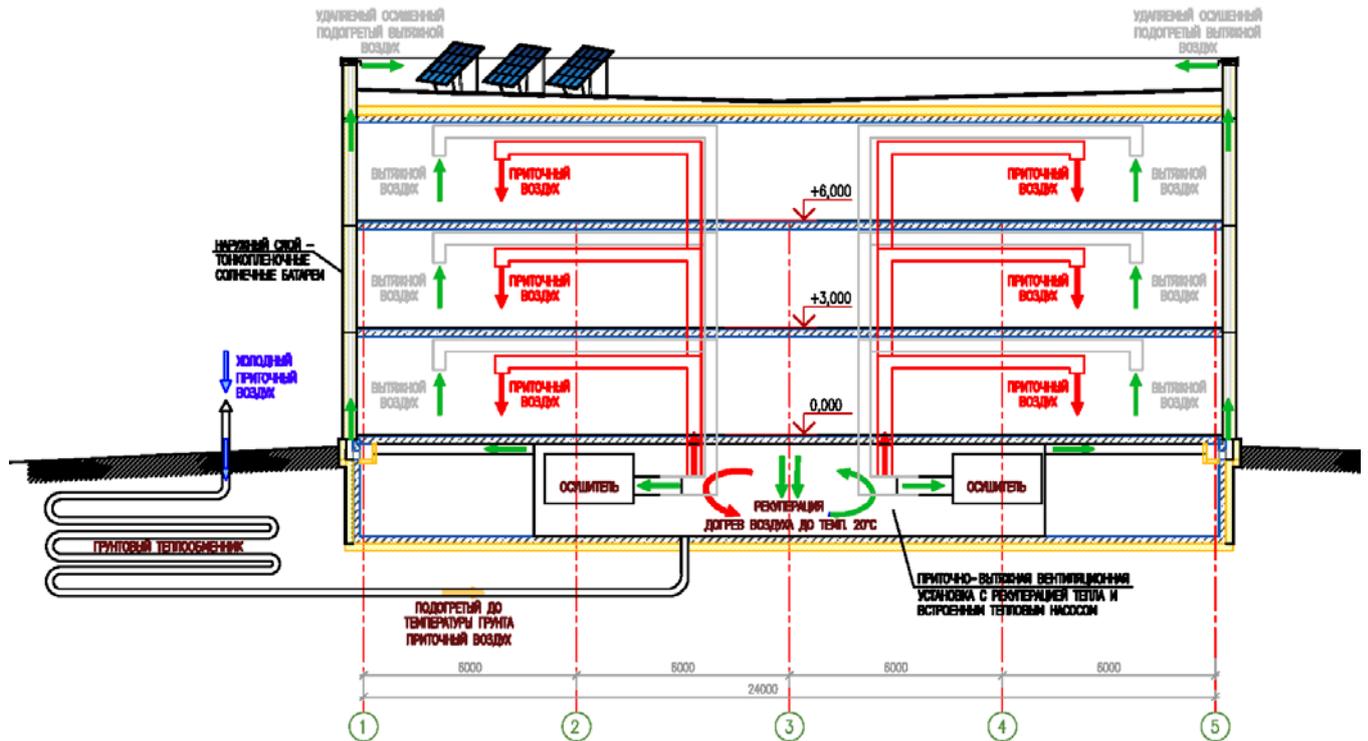
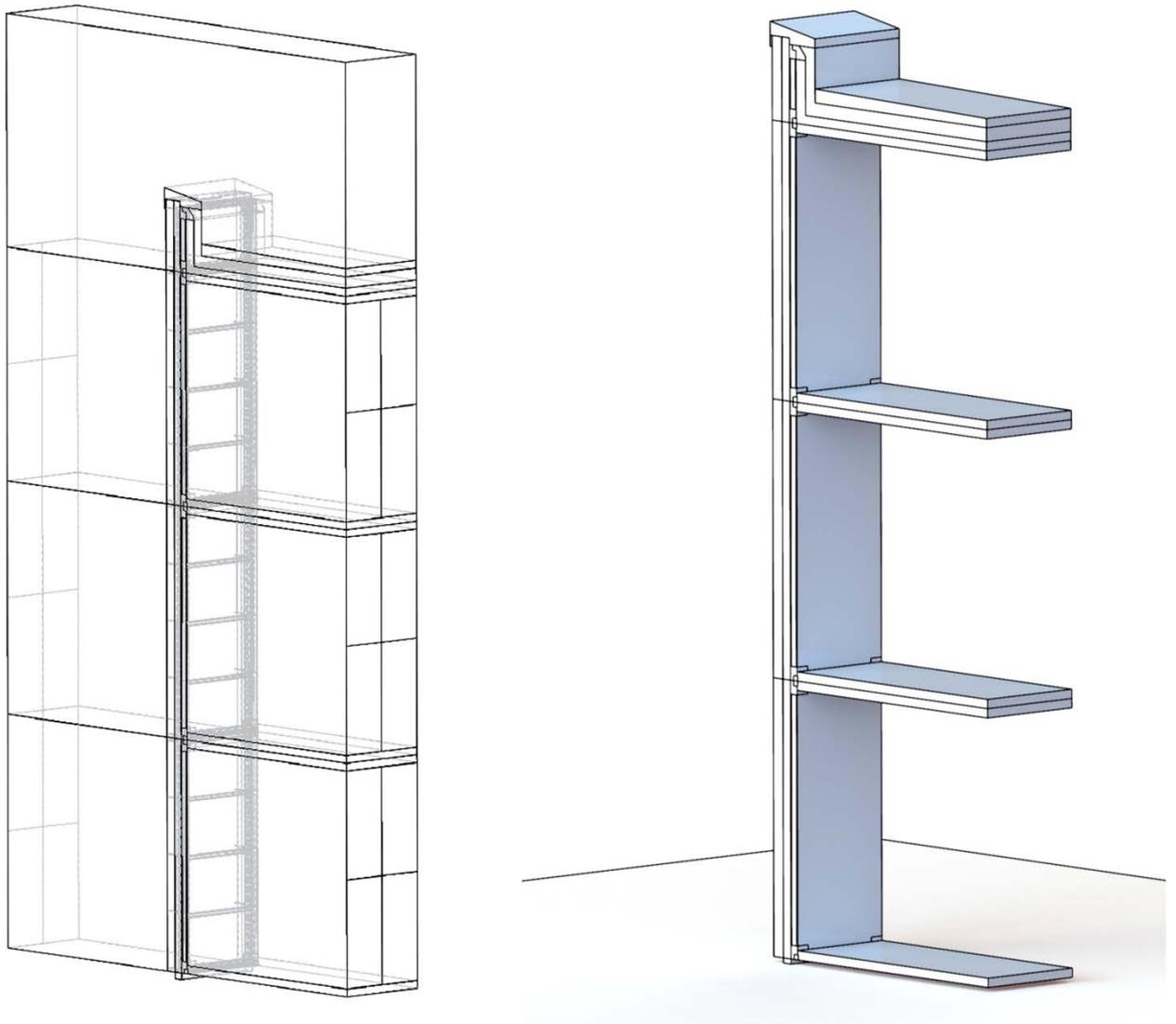


Рис. 4.21. Разрез 1-1

#### 4.2.2 Расчетная модель фасадной конструкции

Для расчета был выбран фрагмент стены без окон. Расчетная модель, выполненная в SOLIDWORKS (рисунок 4.22), состоит из трех панелей для трех этажей (с размерами 1,2х3м(Н)), парапетной панели (размерами 1,2х0,9м(Н)), распределительного лотка в подвале, предназначенного для подачи нагретого воздуха в вентилируемый зазор панели. После импорта геометрии из SOLIDWORKS назначаются именованные выборки (Named Selection) всем поверхностям элементов модели, посредством которых задаются граничные условия и взаимодействия между элементами панели.

Граничные условия по боковым поверхностям панелей определены симметричными (Symmetry).



*Рис. 4.22. Модель SOLIDWORKS*

Утепление со стороны подвала, цоколя и отмостки было задано через граничные условия на поверхностях стенок (wall/shell condition):

- Отмостка задана условно засыпкой керамзитом толщиной 0,3 м.
- Утепление распределительного лотка, нижней поверхности панели выполнено минераловатным утеплителем толщиной 0,2 м. По низу плиты перекрытия над подвалом выполнено утепление толщиной 0,1 м.
- Температура нижней поверхности модели  $T_{middle\_rfc}$ , соответствующая середине плиты перекрытия над подвалом (толщина плиты 200 мм, теплоизоляция снизу 100 мм) определяется по формуле

$$T_{rfc}^{middle} = T_{fl}^{inlet} - 0,058515 \cdot (T_{fl}^{inlet} - T_{bs}^{average}). \quad (4.13)$$

– Температура на входе в зазор МФП принята постоянной и равной 25 °С.

Сетка строилась с помощью рабочего процесса Workflow в Ansys Fluent (рисунки 4.23 – 4.25) [65-66]. Тип элементов объемной сетки – polyhedra/polyhexcore. Количество элементов – более 33 млн. шт., количество узлов – более 126 млн. шт. Минимальный размер ячейки – 1 мм, максимальный – 300 мм. Степень роста элементов принята равной 1,2 (рисунок 4.26).

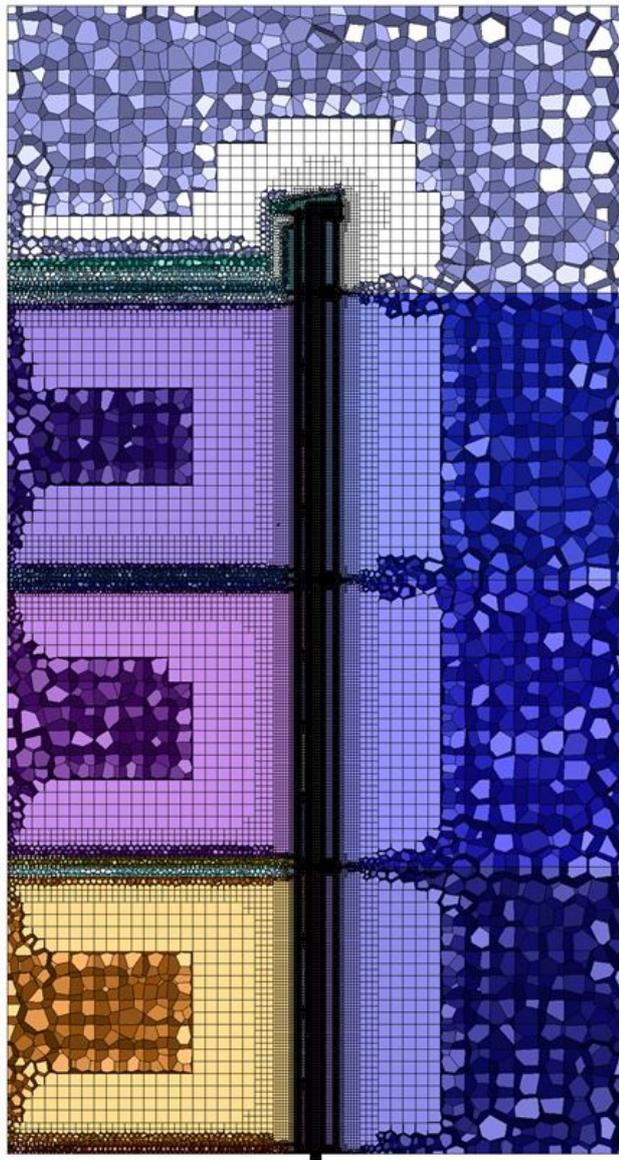
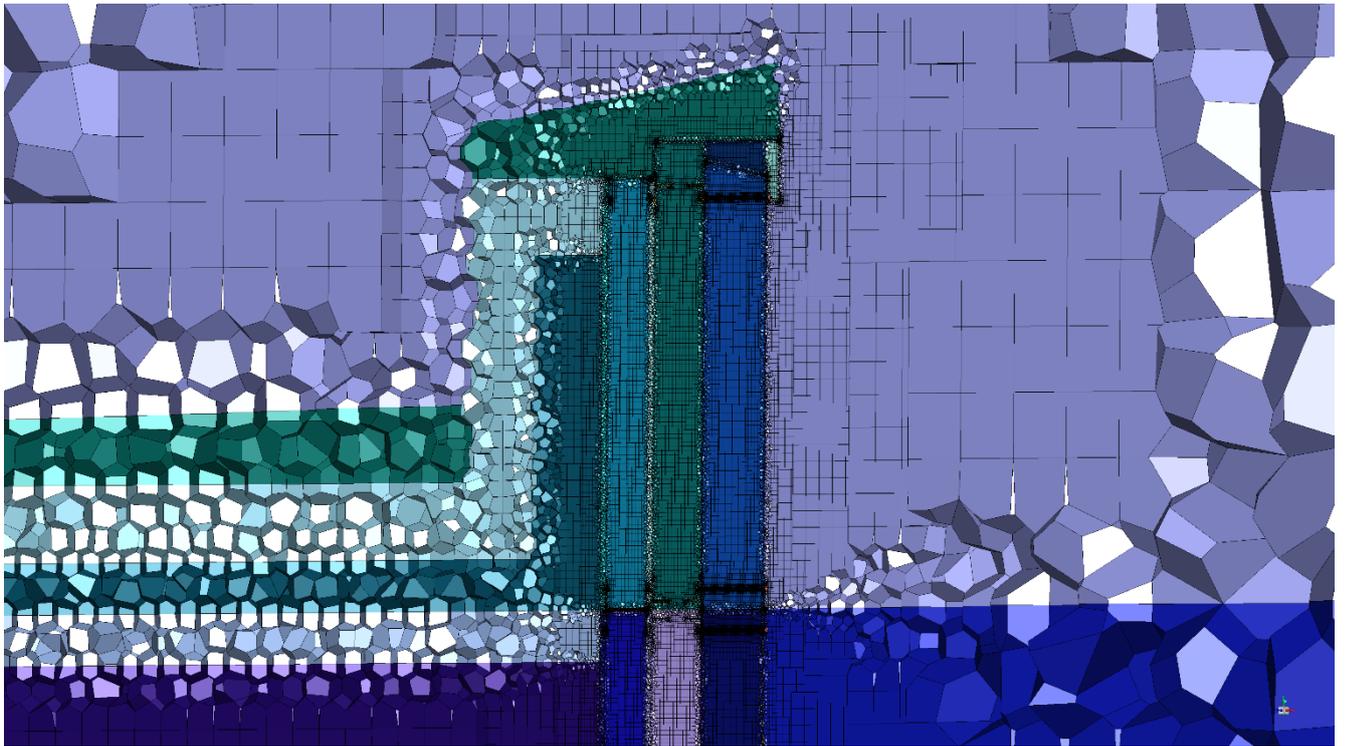
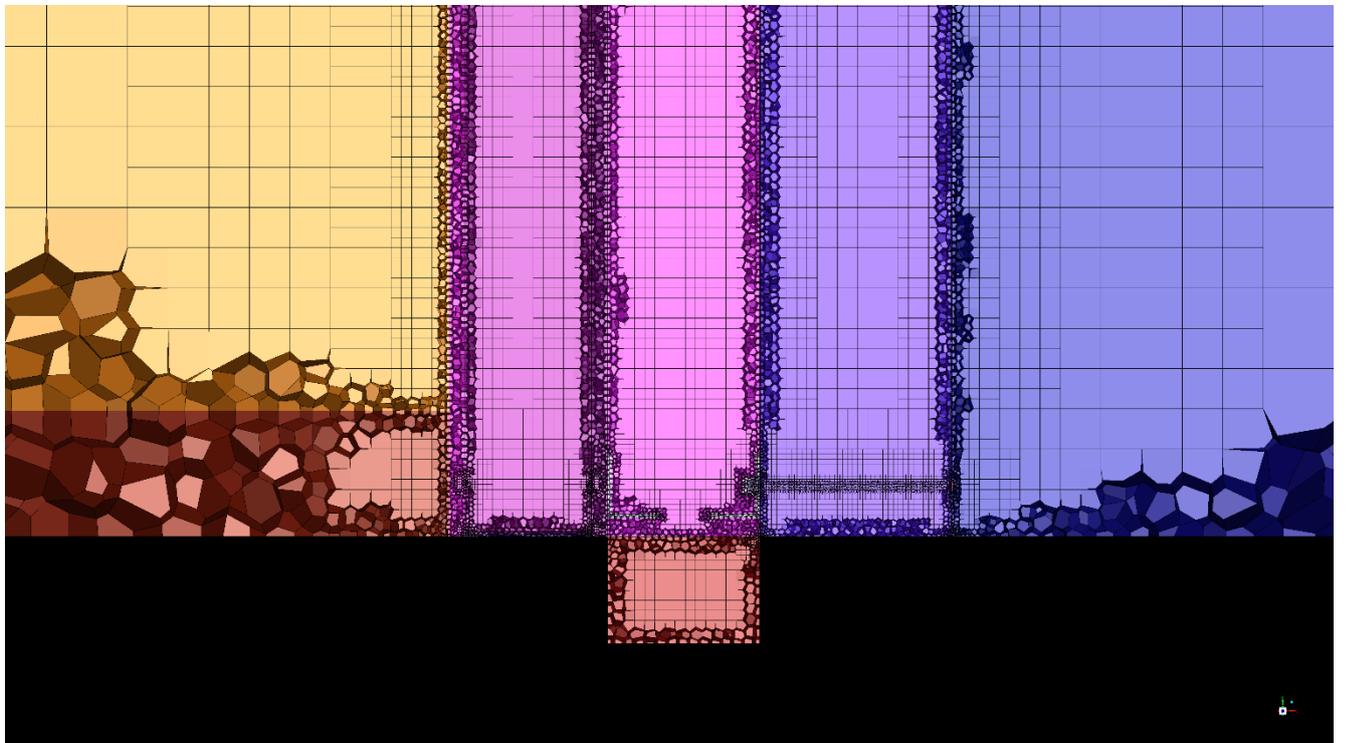


Рис. 4.23. Общий вид сетки модели в Ansys Fluent



*Рис. 4.24. Сетка парапетной панели в Ansys Fluent*



*Рис. 4.25. Сетка входного лотка и панели первого этажа в Ansys Fluent*

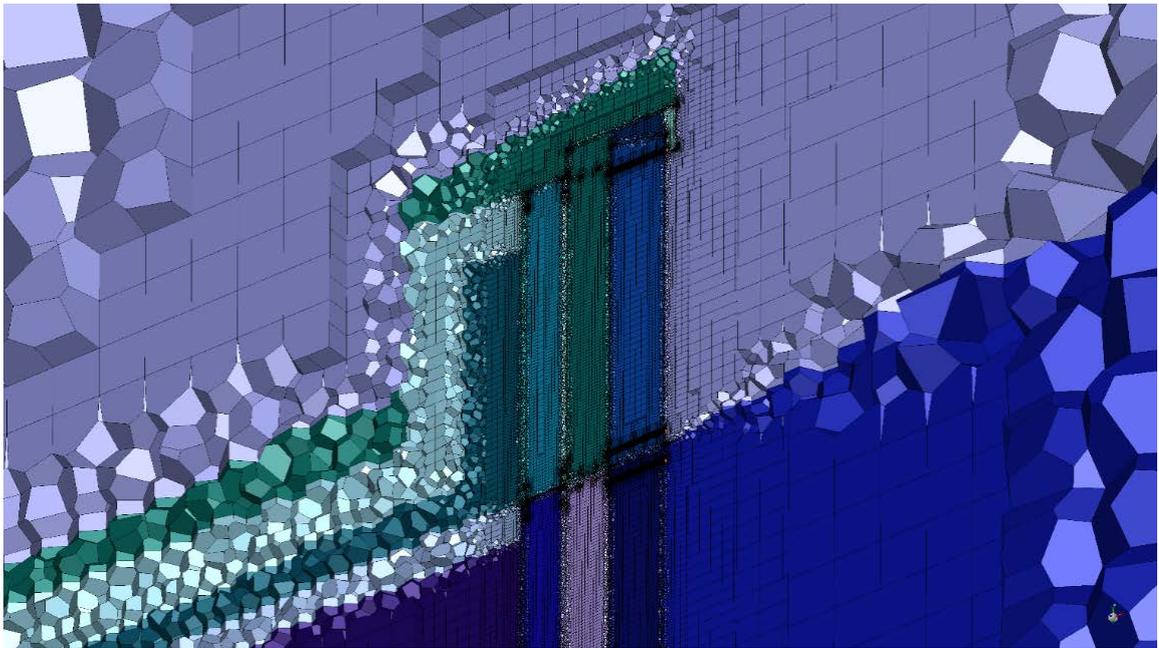


Рис. 4.26. Ячейки сетки в аксонометрии в Ansys Fluent

### 4.2.3 Свойства материалов расчетной модели МФП

В ANSYS Fluent для всех элементов задаются типы материалов и их свойства (таблица 4.5).

Таблица 4.5

Свойства материалов расчетной модели

Материал	Плотность, $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент теплопроводности, $\lambda$ , Вт/(м·К)	Удельная теплоемкость, $C_p$ , Дж/(кг·К)
Алюминий (aluminium)	2719	202,4	871
Аквапанель (aquapanel)	1200	0,35	900
Железобетон (reinforced_concrete)	2500	2,04	840
Каменная вата (thermal_insulation)	110	0,041	920
Керамзит (expanded_clay)	400	0,12	840
Сталь (steel)	7850	70	460
Стяжка из легкого бетона (lightweight_concrete)	880	0,4	850
Термопрофиль стальной (thermal_profile)	7850	7	460
Экструдированный пенополистирол (polysterene)	34	0,034	1450

#### 4.2.4 Граничные условия расчетной модели

В ANSYS Fluent на граничных поверхностях задаются входные параметры модели (рисунок 4.27):

– Входящие значения потока воздуха внешней среды определены посредством задания скорости потока (ветра) –  $V\_wind$  (м/с) и температуры внешней среды  $T\_outside$  (К).

– Заданы значения массового расхода  $Qm\_inlet\_fl$  (кг/с) и температуры приточного воздуха  $T\_inlet\_fl$  (К) в помещениях каждого этажа. Граничным условием выхода вытяжного воздуха из помещения принято условно давление равное атмосферному (pressure-outlet). Заданы значения массового расхода  $Qm\_inlet\_bs$  (кг/с) и температуры воздуха на входе  $T\_inlet\_bs$  (К) в зазор панели. Домен внутри зазора панели взаимосвязан с доменами внешней среды. Массовый расход воздуха  $Qm$  на входе в вентилируемый зазор панели рассчитывается по формуле

$$Q_m = Q \cdot \rho, \quad (4.14)$$

где  $\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

$Q$  – объемный расход воздуха, м<sup>3</sup>/с, который определяется по формуле

$$Q = \frac{V_{внутр} \cdot n}{3600 \cdot N}, \quad (4.15)$$

где  $V_{внутр}$  – объем воздуха внутри здания, м<sup>3</sup>;

$n$  – кратность воздухообмена, 1/ч;

$N$  – число панелей одного этажа, шт.

Массовый расход воздуха  $Q_{m,fl}$  на входе в помещение рассчитывается по формуле

$$Q_m^{fl} = \frac{V_{домена} \cdot \rho}{3600}, \quad (4.16)$$

где  $V_{домена}$  – объем внутреннего воздушного домена на этаже, м<sup>3</sup>.

– Заданы значения температуры воздуха в подвале  $T\_bs\_average$  (К).

– Клапан в парапетной панели для выхода воздуха условно смоделирован как граничное условие «porous jump» между воздушными доменами в зазоре. Заданы параметры пористости: условная толщина, коэффициент пористости, термическое сопротивление ( $0,1 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ ). Значения параметров выбирались из условия отсутствия обратного тока воздуха в зазор панели для заданной скорости ветра.

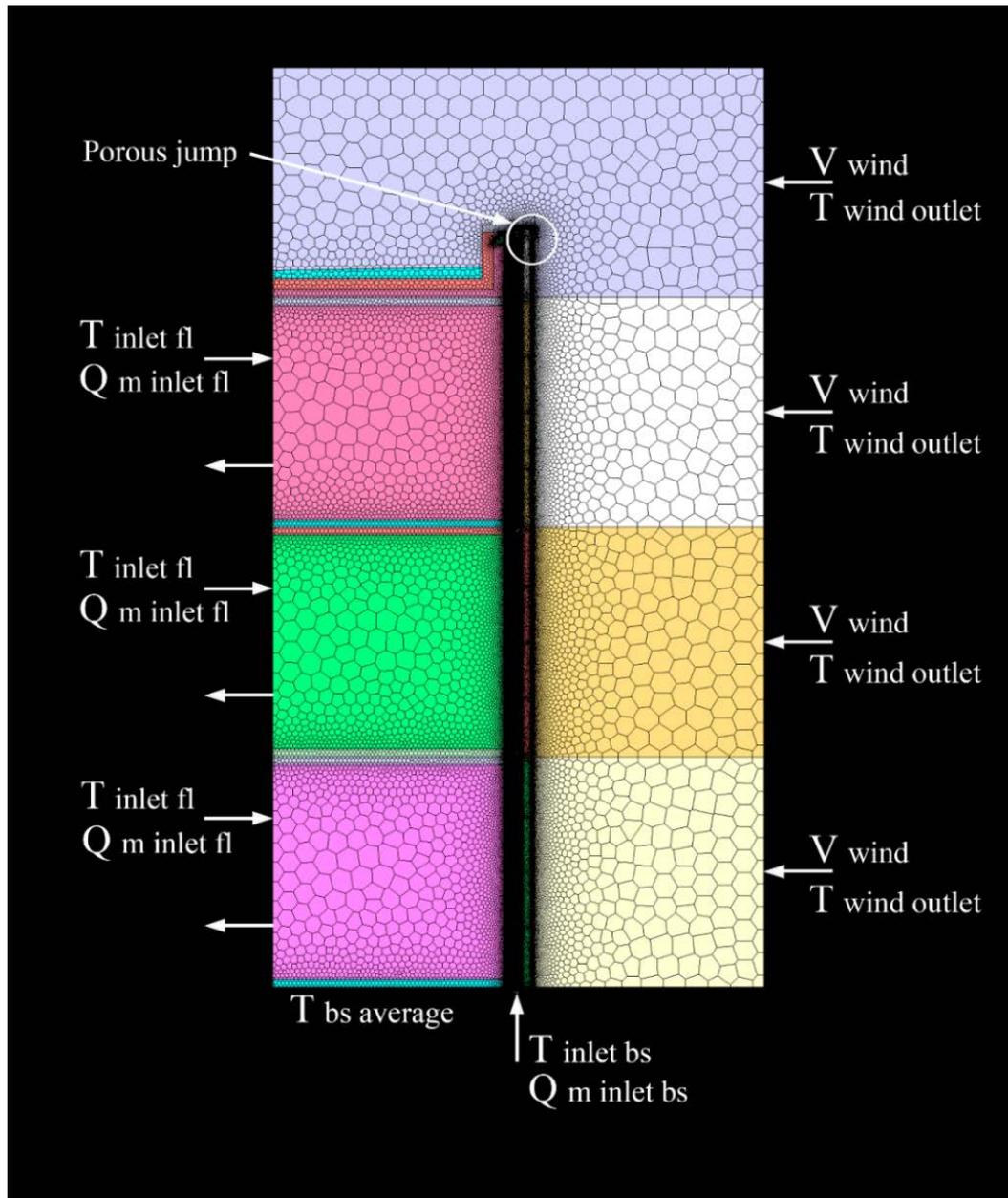


Рис. 4.27. Граничные условия расчетной модели

Выходные параметры модели приведены в таблице 4.6. Принятые обозначения: Bs – подвал, fl1 – 1 этаж, fl2 – 2 этаж, fl3 – 3 этаж, pt – парапет.

Выходные параметры расчетной модели

Наименование, параметр	Расшифровка
p_s4_inlet_bs_ave	Среднее давление на входе в зазор bs
p_s4_bs_fl1_ave	Среднее давление в зазоре между bs и fl1
p_s4_fl1_fl2_ave	Среднее давление в зазоре между fl1 и fl2
p_s4_fl2_fl3_ave	Среднее давление в зазоре между fl2 и fl3
p_s4_fl3_pt_ave	Среднее давление в зазоре между fl3 и pt
s4_pt_valve_ave	Среднее давление в клапане зазора
q_wall_s1_fl1_ave	Плотность теплового потока из помещения fl1
q_wall_s1_fl2_ave	Плотность теплового потока из помещения fl2
q_wall_s1_fl3_ave	Плотность теплового потока из помещения fl3
reynolds_fl1_ave	Число Рейнольдса fl1 среднее значение
reynolds_fl2_ave	Число Рейнольдса fl2 среднее значение
reynolds_fl3_ave	Число Рейнольдса fl2 среднее значение
t_outlet_fl1_ave	Средняя температура на выходе из помещения fl1
t_outlet_fl2_ave	Средняя температура на выходе из помещения fl2
t_outlet_fl3_ave	Средняя температура на выходе из помещения fl3
t_pt_outlet_ave	Средняя температура на выходе из pt
t_s4_bs_fl1_ave	Средняя температура в зазоре между bs и fl1
t_s4_fl1_fl2_ave	Средняя температура в зазоре между fl1 и fl2
t_s4_fl2_fl3_ave	Средняя температура в зазоре между fl2 и fl3
t_s4_fl3_pt_ave	Средняя температура в зазоре между fl3 и pt
t_s4_pt_valve_ave	Средняя температура в зазоре pt в клапане
t_pt_outlet_ave	Средняя температура в зазоре на выходе из pt
t_wall_s1_fl1_ave	Средняя температура стенки s1 fl1 (воздух)
t_wall_s1_fl1_min	Минимальная температура стенки s1 fl1 (воздух)
t_wall_s1_fl2_ave	Средняя температура стенки s1 fl2 (воздух)
t_wall_s1_fl2_min	Минимальная температура стенки s2 fl1 (воздух)

Наименование, параметр	Расшифровка
t_wall_s1_fl3_ave	Средняя температура стенки s1 fl3 (воздух)
t_wall_s1_fl3_min	Минимальная температура стенки s3 fl1 (воздух)
t_wall_s1_pt_ave	Средняя температура стенки s1 pt
t_wall_s1_pt_min	Минимальная температура стенки s1 pt
t_wall_s3_fl1_ave	Средняя температура стенки s3 fl1 (воздух)
t_wall_s3_fl1_min	Минимальная температура стенки s3 fl1 (воздух)
t_wall_s3_fl2_ave	Средняя температура стенки s3 fl2 (воздух)
t_wall_s3_fl2_min	Минимальная температура стенки s3 fl2 (воздух)
t_wall_s3_fl3_ave	Средняя температура стенки s3 fl3 (воздух)
t_wall_s3_fl3_min	Минимальная температура стенки s3 fl3 (воздух)
t_wall_s3_pt_min	Минимальная температура стенки s3 pt (воздух)
t_wall_s4_fl1_min	Минимальная температура стенки s4 fl1 (воздух)
t_wall_s4_fl2_min	Минимальная температура стенки s4 fl2 (воздух)
t_wall_s4_fl3_min	Минимальная температура стенки s4 fl3 (воздух)
t_wall_s4_pt_min	Минимальная температура стенки s4 pt (воздух)
t_wall_s5_fl1_ave	Средняя температура стенки s5 fl1 (воздух)
t_wall_s5_fl1_min	Минимальная температура стенки s5 fl1 (воздух)
t_wall_s5_fl2_ave	Средняя температура стенки s5 fl2 (воздух)
t_wall_s5_fl2_min	Минимальная температура стенки s5 fl2 (воздух)
t_wall_s5_fl3_ave	Средняя температура стенки s5 fl3 (воздух)
t_wall_s5_fl3_min	Минимальная температура стенки s5 fl3 (воздух)
t_wall_s5_pt_min	Минимальная температура стенки s5 pt (воздух)
t_wall_s7_fl1_ave	Средняя температура стенки s7 fl1 (воздух)
t_wall_s7_fl2_ave	Средняя температура стенки s7 fl2 (воздух)
t_wall_s7_fl3_ave	Средняя температура стенки s7 fl3 (воздух)

#### 4.2.5 Уточнение параметров панели на первом этапе расчета на основе теории планирования эксперимента

Расчет в первом приближении проводился при температуре наружного воздуха, равной средней температуре наиболее холодного месяца, при одинаковых внешних и внутренних условиях (скорость ветра, массовый расход воздуха, температура приточного воздуха в помещениях и вентилируемом зазоре). Вычисления первого этапа ограничены 1200 итераций на каждый расчетный случай. Входные параметры расчетной модели приведены в таблице 4.7.

Таблица 4.7

Входные параметры расчетной модели

Наименование, параметр	Расшифровка	Значение	Единицы измерения
Qm_inlet_bs	Массовый расход на входе в вентилируемый зазор панели	0,016	кг/с
T_inlet_bs	Температура воздуха на входе в вентилируемый зазор	298	К
Qm_inlet_fl	Массовый расход на этаже (приточный воздух)	0,00333531	кг/с
T_inlet_fl	Температура на входе на этаж (приточный воздух)	294	К
V_wind	Скорость ветра, 5 м/с	5	м/с
T_wind_outlet	Температура ветра (улицы), равная средней температуре наиболее холодного месяца (января) для г. Екатеринбурга	259,3	К
W_heat_flux_floor	Тепловой поток (теплый пол), Вт/м <sup>2</sup>	0	Вт/м <sup>2</sup>
T_bs_average	Средняя температура воздуха в подвале 278 К	278	К

При подборе оптимальных геометрических параметров многослойной фасадной панели, должны соблюдаться следующие условия:

- общая толщина панели не должна превышать 400 мм, что соответствует средней толщине стены с утеплением и конструкцией вентилируемого фасада;
- разница температур внутренней поверхности стенки и воздуха в помещении должна составлять не более 4 °С [67];

– температура элементов вентилируемого зазора должна быть выше точки росы обтекающего их воздуха.

Для выбора оптимальных параметров МФП воспользуемся теорией планирования эксперимента [68-71].

Целью исследования является определение набора параметров, при которых приведенное сопротивление теплопередаче примет максимальное значение с одновременным выполнением вышеописанных условий

$$\begin{cases} R_{мфп} = f(X_1, X_2, X_3) \rightarrow \max, \\ (t_{inlet\_fl} - t_{wall\_s1\_min}) \leq \Delta t^H, \\ t_{wall\_s3\_min} \geq t_p, \\ t_{wall\_s4\_min} \geq t_p, \\ t_{wall\_s5\_min} \geq t_p, \end{cases} \quad (4.17)$$

где  $R_{мфп}$  - приведенное сопротивление теплопередаче, ( $m^2 \cdot ^\circ C / Вт$ );

$X_1$  - толщина внешнего слоя теплоизоляции, мм;

$X_2$  - величина вентилируемого зазора, мм;

$X_3$  - толщина внутреннего слоя теплоизоляции, мм;

$t_{inlet\_fl}$  - температура воздуха в помещении,  $^\circ C$ ;

$t_{wall\_s1\_min}$  - минимальная температура внутренней стенки панели,  $^\circ C$ ;

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

$t_{wall\_s4\_min}$  - минимальная температура несущего швеллера,  $^\circ C$ ;

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

$t_p$  - точка росы,  $^\circ C$ .

Из результатов предыдущих исследований были определены материалы для элементов МФП, количество и расположение крепежных элементов, образующих

«мостики холода», требуемая толщина несущего профиля, образующего вентилируемый зазор.

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  $X_1, X_2, X_3$ . Интервал варьирования величины  $X_1$  принят равным 25 мм при величине основного уровня 125 мм, такой шаг обусловлен стандартной толщиной сэндвич-панели. Интервал варьирования величины  $X_2$  принят равным 20 мм при величине основного уровня 100 мм, такой шаг обусловлен сортаментом швеллеров [71]. Интервал варьирования величины  $X_3$  принят равным 20 мм при величине основного уровня 80 мм, такой шаг обусловлен типоразмером термопрофиля. В таблице 4.8 представлены 27 вариантов сочетаний  $X_1, X_2, X_3$ .

В первом этапе эксперимента определены обобщающие показатели  $Y$  на основании преобразованных частных откликов

$$\begin{aligned}
 y_1 &= \begin{cases} 1, & \text{если } (t_{inlet\_fl} - t_{wall\_s1\_min}) \leq \Delta t^H, \\ 0, & \text{если } (t_{inlet\_fl} - t_{wall\_s1\_min}) > \Delta t^H, \end{cases} \\
 y_2 &= \begin{cases} 1, & \text{если } t_{wall\_s3\_min} \geq t_p, \\ 0, & \text{если } t_{wall\_s3\_min} < t_p, \end{cases} \\
 y_3 &= \begin{cases} 1, & \text{если } t_{wall\_s4\_min} \geq t_p, \\ 0, & \text{если } t_{wall\_s4\_min} < t_p, \end{cases} \\
 y_4 &= \begin{cases} 1, & \text{если } t_{wall\_s5\_min} \geq t_p, \\ 0, & \text{если } t_{wall\_s5\_min} < t_p. \end{cases}
 \end{aligned} \tag{4.18}$$

Обобщающий показатель  $Y$  определяется

$$Y = \sqrt[4]{y_1 y_2 y_3 y_4}. \tag{4.19}$$

В таблице 4.8 представлены преобразованные частные и обобщённые отклики для каждого опыта.

Таблица 4.8

*Определение обобщенных откликов*

№ опыта	$X_1$ , мм	$X_2$ , мм	$X_3$ , мм	Общая толщина МФП, мм	Преобразованные частные отклики				Обобщенный отклик $Y$
					$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$	
1	150	120	60	357	0	1	1	1	0
<b>2</b>	<b>150</b>	<b>120</b>	<b>80</b>	377	1	1	1	1	<b>1</b>
<b>3</b>	<b>150</b>	<b>120</b>	<b>100</b>	397	1	1	1	1	<b>1</b>
4	150	100	60	337	0	1	1	1	0
<b>5</b>	<b>150</b>	<b>100</b>	<b>80</b>	357	1	1	1	1	<b>1</b>
<b>6</b>	<b>150</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	377	1	1	1	1	<b>1</b>
7	150	80	60	317	0	1	1	1	0
<b>8</b>	<b>150</b>	<b>80</b>	<b>80</b>	337	1	1	1	1	<b>1</b>
9	150	80	100	357	0	1	1	1	0
10	125	120	60	332	0	1	1	1	0
<b>11</b>	<b>125</b>	<b>120</b>	<b>80</b>	352	1	1	1	1	<b>1</b>
12	125	120	100	372	0	1	1	1	0
13	125	100	60	312	0	1	1	1	0
14	125	100	80	332	0	1	1	1	0
15	125	100	100	352	0	1	1	1	0
16	125	80	60	292	0	1	1	1	0
17	125	80	80	312	0	1	1	1	0
18	125	80	100	332	0	1	1	1	0
19	100	120	60	307	0	1	1	1	0
20	100	120	80	327	0	1	1	1	0

№ опыта	$X_1$ , мм	$X_2$ , мм	$X_3$ , мм	Общая толщина МФП, мм	Преобразованные частные отклики				Обобщенный отклик $Y$
					$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$	
21	100	120	100	347	0	1	1	1	0
22	100	100	60	287	0	1	1	1	0
23	100	100	80	307	0	1	1	1	0
24	100	100	100	327	0	1	1	1	0
25	100	80	60	267	0	1	1	1	0
26	100	80	80	287	0	1	1	1	0
27	100	80	100	307	0	1	1	1	0

Согласно составленному плану эксперимента были проведены расчеты для 27 расчетных случаев. Для экономии времени в первом этапе эксперимента для всех вариантов рассматривалось выполнение всех условий, кроме расчета приведенного сопротивления теплопередаче панели, так как определение этого параметра выполняется аналитически. Результаты обобщенных откликов показали, что только для шести опытов (№2,3,5,6,8,11) выполнены условия по нормируемому перепаду между температурами внутренней стенки и воздуха в помещении.

#### **4.2.6 Выбор оптимальных геометрических параметров МФП на втором этапе теплотехнических расчетов**

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 (таблица 4.9) 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 на каждый расчетный случай.

Таблица 4.9

Геометрические параметры МФП для 6 расчетных случаев для второго этапа расчета

№ расчетного случая	Толщина внешнего слоя теплоизоляции, мм (thermal_insulation_s6)	Ширина вентилируемого зазора, мм (perforated_frame_s4)	Толщина внутреннего слоя теплоизоляции, мм (thermal_insulation_s2)	Общая толщина МФП, мм
1	150	120	80	377
2	150	100	80	357
3	150	80	80	337
4	150	100	100	377
5	125	120	80	352
6	150	120	100	397

Приведенное сопротивление теплопередаче МФП определяется для каждого этажа по формуле

$$R_{мфп}^i = \frac{T_{wall\_s1}^{ave\ i} - T_{wall\_s7}^{ave\ i}}{q^i}, \quad (4.20)$$

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

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

$q^i$  - плотность теплового потока через панель МФП, Вт/м<sup>2</sup>, определенная по формуле

$$q^i = q_{35}^i + q_{13}^i. \quad (4.21)$$

Плотность теплового потока в зазоре  $q^i$  (Вт/м<sup>2</sup>) определяется по формуле

$$q_{35}^i = \frac{Q_{35}^i}{S_{35}^i}, \quad (4.22)$$

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

$S^i$  - площадь теплообмена в зазоре МФП, м<sup>2</sup>.

Плотность теплового потока в направлении из помещения в зазор  $q_{13}^i$  (Вт/м<sup>2</sup>) определяем по формуле

$$q_{13}^i = \frac{T_{wall\_s1}^{ave\ i} - T_{wall\_s3}^{ave\ i}}{R_{13}^i}, \quad (4.23)$$

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

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

$R_{13}^i$  - приведенное сопротивление теплопередаче внутреннего слоя панели МФП, Вт/м<sup>2</sup>.

Тепловой поток в зазоре определяется по формуле

$$Q_{35}^i = Q_m \cdot C \cdot \Delta T, \quad (4.24)$$

где  $Q_m$  - массовый расход воздуха в зазоре, кг/с;

$C$  - теплоемкость воздуха, Дж/(кг·°С);

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

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

$$R_{mfn} = \frac{\sum_{i=1}^{i=3} R_{mfn}^i}{n}, \quad (4.25)$$

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

$n$  - количество этажей.

Расчетные значения средних температур на контрольных поверхностях модели для 6 вариантов сочетания геометрических параметров приведены в таблице 4.10.

Расчетные значения средних температур на контрольных поверхностях модели

№ расчетного случая	Этаж	Средняя температура стенки со стороны помещения, °С	Средняя температура стенки со стороны улицы, °С	Температура воздуха в зазоре на входе в панель, °С	Температура воздуха в зазоре на выходе из панели, °С	Средняя температура стенки в зазоре со стороны улицы, °С	Средняя температура стенки в зазоре со стороны помещения, °С	Средняя температура воздуха в зазоре, °С
1	1	21,09	-12,83	24,28	21,52	18,88	21,88	22,90
	2	20,80	-13,32	21,52	19,38	17,52	20,16	20,45
	3	20,39	-13,31	19,38	17,52	15,70	18,58	18,45
2	1	21,11	-13,04	24,54	21,51	18,93	21,88	23,03
	2	20,86	-13,38	21,51	19,70	17,74	20,35	20,61
	3	20,37	-13,36	19,70	18,11	16,10	18,60	18,91
3	1	20,94	-12,98	24,66	21,66	18,70	20,99	23,16
	2	20,80	-13,35	21,66	19,54	17,40	20,02	20,60
	3	20,32	-13,34	19,54	17,66	15,87	18,50	18,60
4	1	21,07	-12,91	24,59	21,60	18,88	21,81	23,10
	2	20,86	-13,35	21,60	19,48	17,40	20,31	20,54
	3	20,41	-13,34	19,48	17,45	15,70	18,51	18,47
5	1	21,03	-12,63	24,18	21,00	18,37	21,48	22,59
	2	20,75	-13,25	21,00	18,75	16,67	19,61	19,88
	3	20,45	-13,23	18,75	17,02	14,94	18,15	17,89
6	1	21,11	-12,75	24,31	21,58	18,89	21,92	22,95
	2	20,83	-13,27	21,58	19,31	17,61	20,32	20,45
	3	20,48	-13,27	19,31	17,66	15,86	18,48	18,49

Расчет приведенного сопротивления теплопередаче панели представлен в таблице 4.11.

## Расчет приведенного сопротивления теплопередаче панели

№ расчетного случая	Этаж	Расчетный тепловой напор по воздуху, °С	Теплоемкость воздуха при средней температуре, Дж/(кг·°С)	Тепловой поток, Вт	Площадь теплообмена в зазоре, м <sup>2</sup>	Плотность теплового потока в зазоре суммарная, Вт/м <sup>2</sup>	Плотность теплового потока в направлении из помещения, Вт/м <sup>2</sup>	Плотность теплового потока суммарная, Вт/м <sup>2</sup>	Приведенное сопротивление теплопередаче панели, м <sup>2</sup> ·°С/Вт
1	1	2,76	1005	44,38	8,765	5,06	-0,50	4,56	7,438
	2	2,14	1005	34,41	8,765	3,93	0,41	4,33	7,873
	3	1,86	1005	29,91	8,765	3,41	1,15	4,57	7,382
	<b>R<sub>мп</sub>, м<sup>2</sup>·°С/Вт</b>								
2	1	3,03	1005	48,72	8,434	5,78	-0,49	5,29	6,460
	2	1,81	1005	29,10	8,434	3,45	0,32	3,78	9,068
	3	1,59	1005	25,57	8,434	3,03	1,13	4,16	8,110
	<b>R<sub>мп</sub>, м<sup>2</sup>·°С/Вт</b>								
3	1	3,00	1005	48,24	8,104	5,95	-0,03	5,92	5,729
	2	2,12	1005	34,09	8,104	4,21	0,50	4,70	7,261
	3	1,88	1005	30,23	8,104	3,73	1,16	4,89	6,884
	<b>R<sub>мп</sub>, м<sup>2</sup>·°С/Вт</b>								
4	1	2,99	1005	48,08	8,434	5,70	-0,41	5,29	6,427
	2	2,12	1005	34,09	8,434	4,04	0,31	4,35	7,866
	3	2,03	1005	32,64	8,434	3,87	1,06	4,93	6,843
	<b>R<sub>мп</sub>, м<sup>2</sup>·°С/Вт</b>								
5	1	3,18	1005	51,13	8,765	5,83	-0,29	5,55	6,068
	2	2,25	1005	36,18	8,765	4,13	0,73	4,85	7,005
	3	1,73	1005	27,82	8,765	3,17	1,46	4,64	7,261
	<b>R<sub>мп</sub>, м<sup>2</sup>·°С/Вт</b>								
6	1	2,73	1005	43,90	8,765	5,01	-0,45	4,56	7,432
	2	2,27	1005	36,50	8,765	4,16	0,28	4,45	7,664
	3	1,65	1005	26,53	8,765	3,03	1,12	4,14	8,144
	<b>R<sub>мп</sub>, м<sup>2</sup>·°С/Вт</b>								

По результатам анализа выполненных расчетов приведенного сопротивления теплопередаче панели (таблица 4.11) определены оптимальные геометрические параметры, соответствующие расчетному случаю №2. Таким образом, максимальное значение приведенного сопротивления теплопередаче получено при общей толщине МФП равной 357 мм: толщина внутреннего слоя теплоизоляции составляет 80 мм, толщина внешнего слоя теплоизоляции составляет 150 мм, воздушный зазор панели 100 мм.

#### **4.2.7 Определение зависимости приведенного сопротивления теплопередаче МФП от изменения внешних условий на третьем этапе теплотехнических расчетов**

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».

Граничные условия для десяти расчетных случаев приведены в таблице 4.12.

Граничные условия для определения сопротивления теплопередаче МФП на третьем этапе расчета

№ расчетного случая	Температура ветра (улицы), °С, T_wind_outlet	Массовый расход на входе в МФП, кг/с Qm_inlet_bs	Массовый расход на этаже, кг/с Qm_inlet_fl	Теплый пол (тепловой поток), W_heat_flux_floor, Вт/м <sup>2</sup>	Скорость ветра, V_wind, м/с	Средняя температура воздуха в подвале, T_bs_average, °С	Температура воздуха на входе в МФП, T_inlet_bs, °С
1	-32,0	0,016	0,0033	0	5	5	25
2	-32,0	0,016	0,0333	70	5	5	25
3	-32,0	0,032	0,0066	0	5	5	25
4	-27,5	0,016	0,0033	0	5	5	25
5	-23,0	0,016	0,0033	0	5	5	25
6	-18,0	0,016	0,0033	0	5	5	25
7	-13,7	0,016	0,0033	0	5	5	25
8	-9,3	0,016	0,0033	0	5	5	25
9	-5,0	0,016	0,0033	0	5	5	25
10	+38,0	0,016	0,0033	0	5	15	11

Для увеличения точности результатов расчета третьего этапа для каждого расчетного случая собран массив данных выходных значений параметров с каждой итерации, итоговое значение параметров определено как среднее за последние 200 итераций в интервале с 1800 по 2000 итерацию.

На графиках сходимости (рисунки 4.28-4.33) для разных наружных температур можно наблюдать установившийся режим после 1200 итераций.

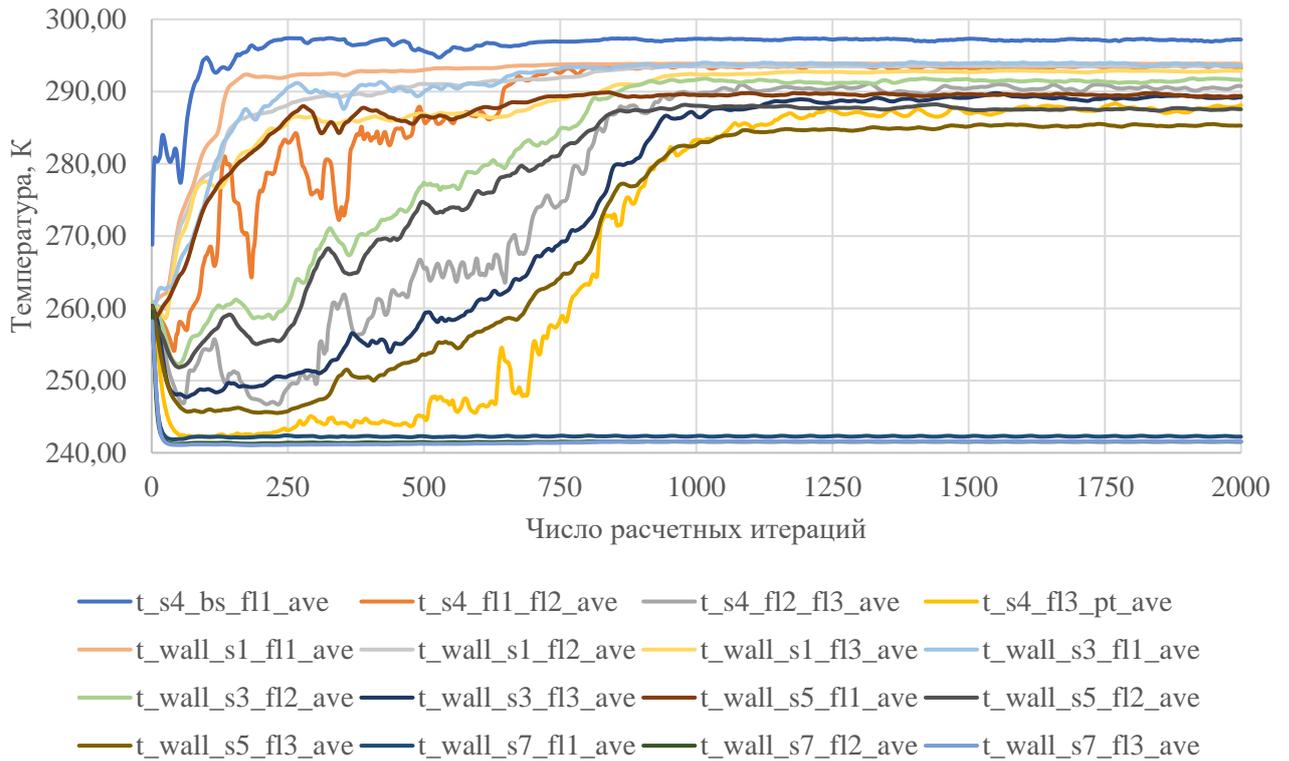


Рис. 4.28. График сходимости для расчетного случая №1  
(при наружной температуре  $-32,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) в Ansys Fluent

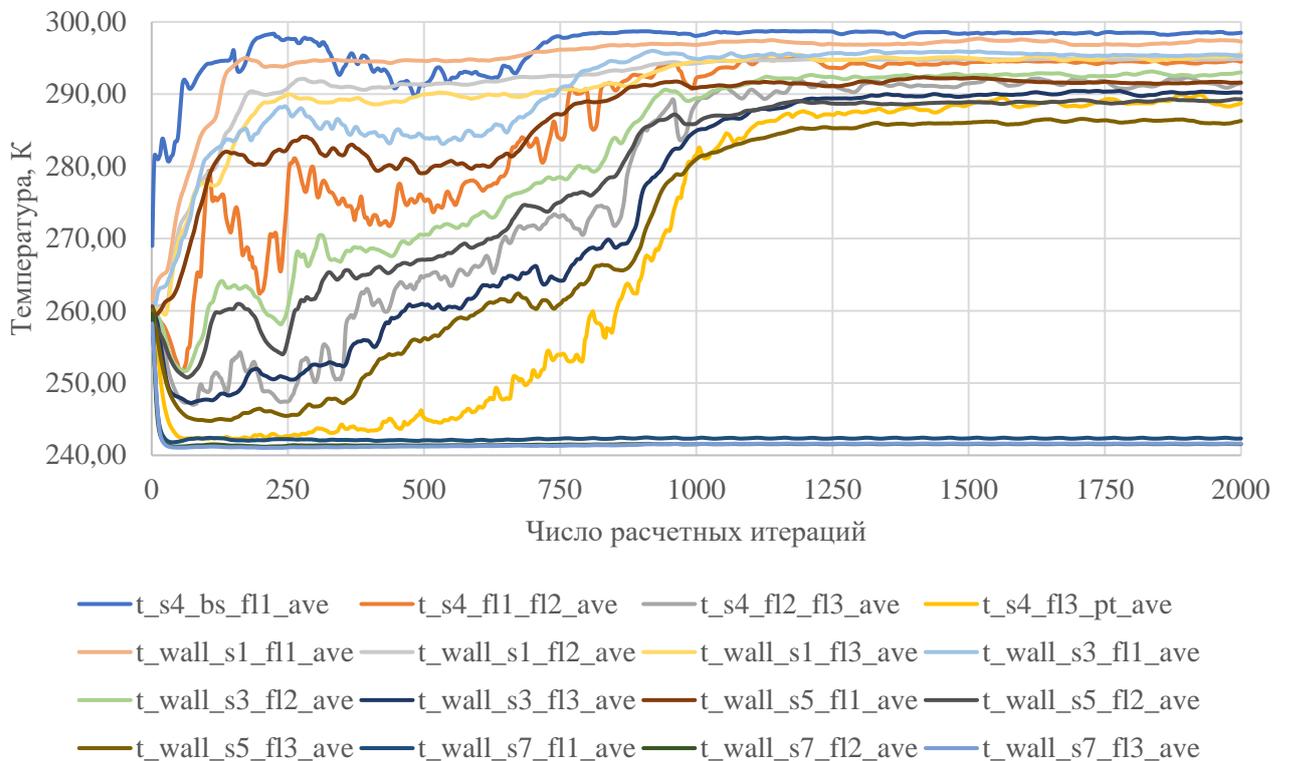
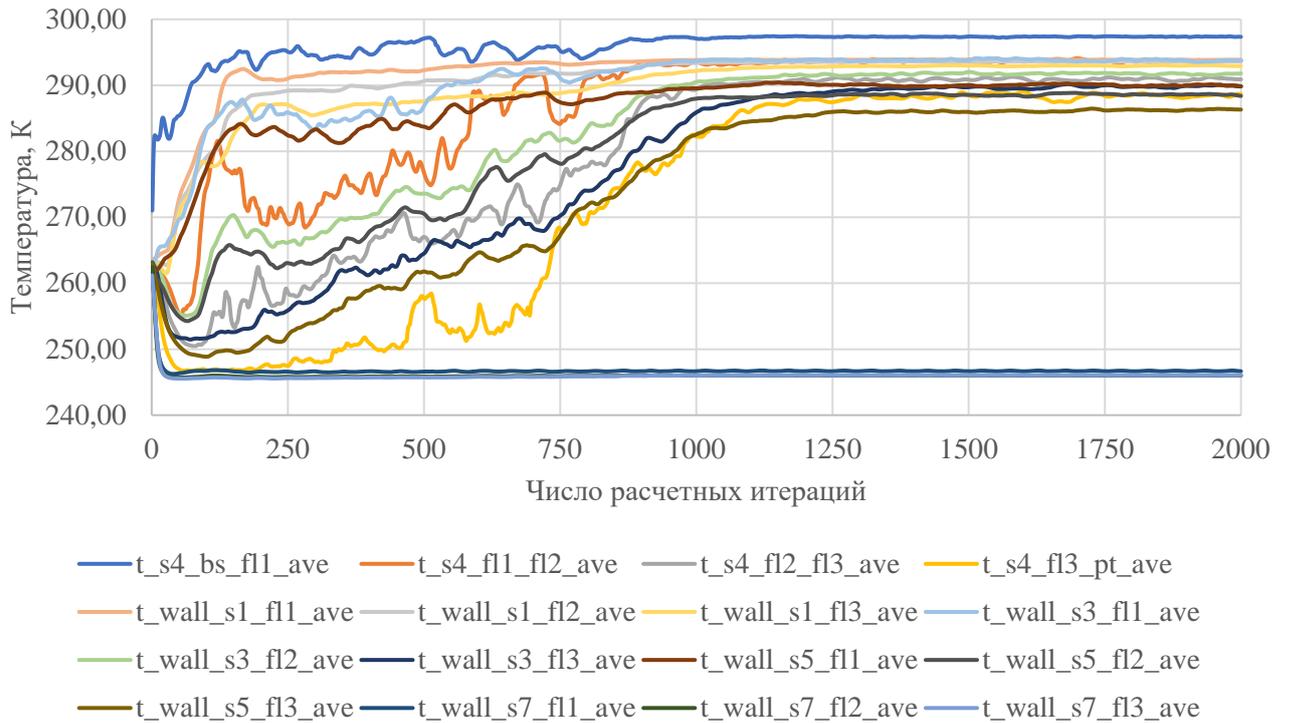
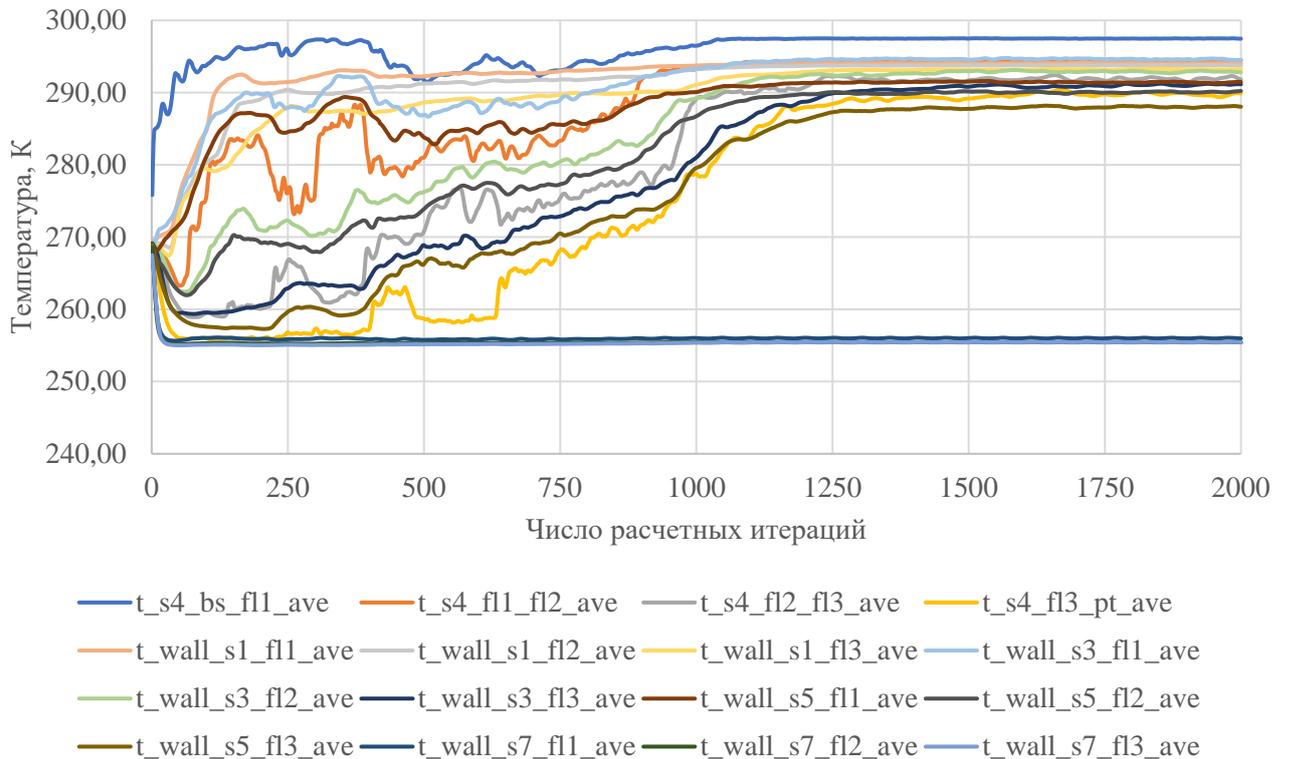


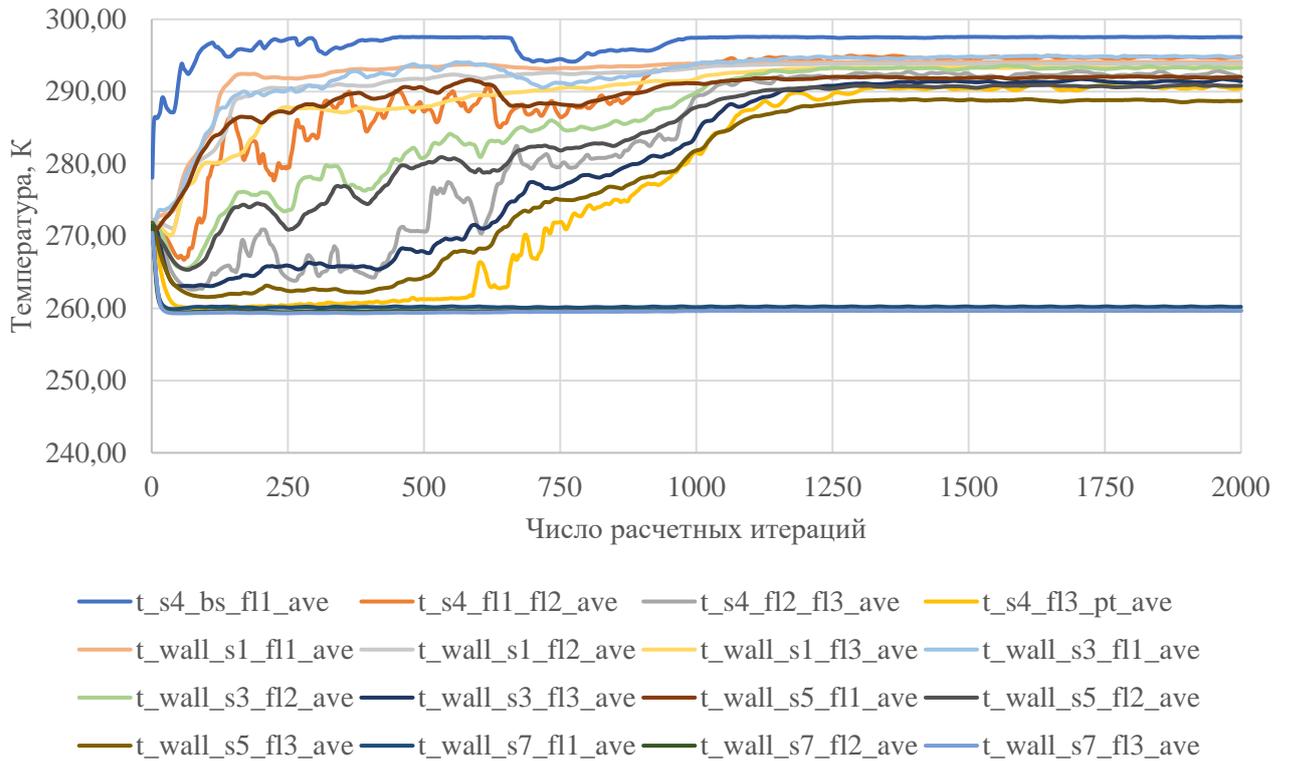
Рис. 4.29. График сходимости для расчетного случая №2  
(при наружной температуре  $-32,0\text{ }^{\circ}\text{C}$  с системой «теплый пол»  $70\text{ Вт/м}^2$ ) в Ansys Fluent



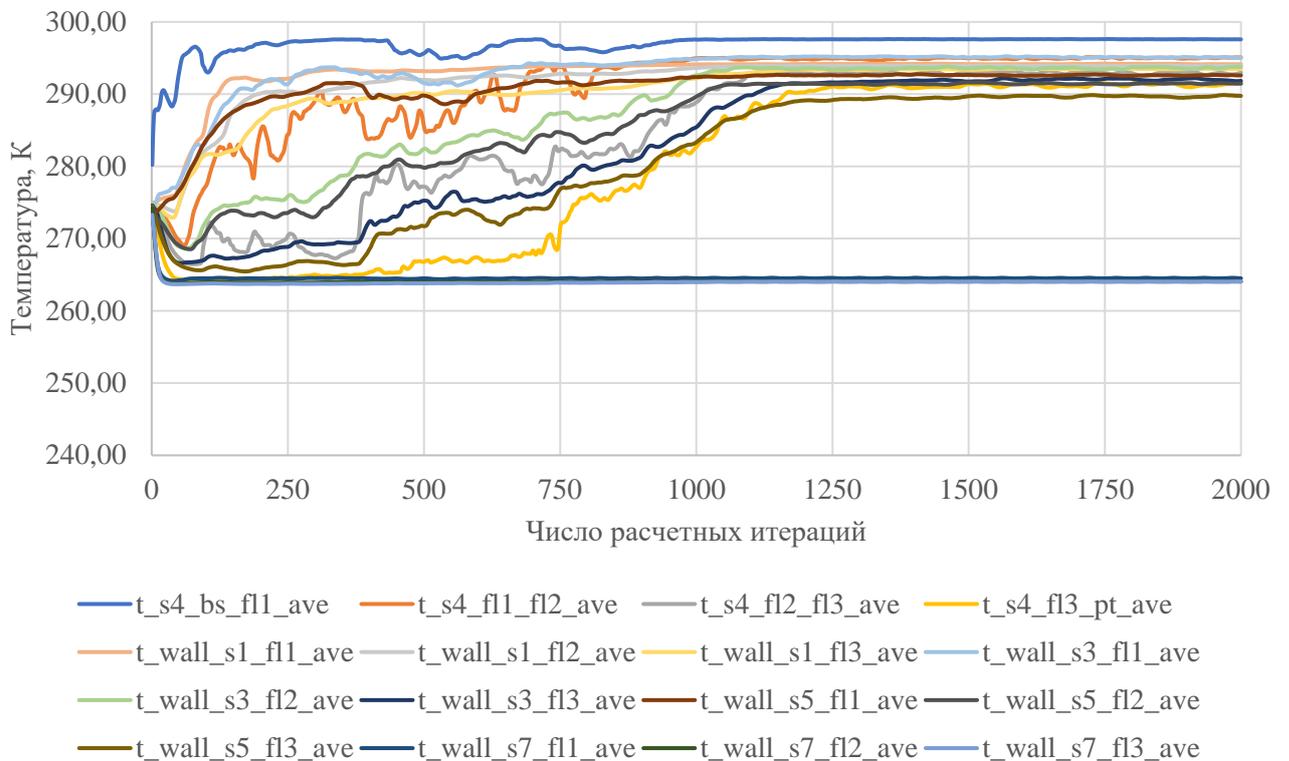
*Рис. 4.30. График сходимости для расчетного случая №4  
(при наружной температуре -27,5 °C) в Ansys Fluent*



*Рис. 4.31. График сходимости для расчетного случая №6  
(при наружной температуре -18,0 °C) в Ansys Fluent*



*Рис. 4.32. График сходимости для расчетного случая №7  
(при наружной температуре  $-13,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) в Ansys Fluent*



*Рис. 4.33. График сходимости для расчетного случая №8  
(при наружной температуре  $-9,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) в Ansys Fluent*

Расчетные значения средних температур на контрольных поверхностях модели для 10 вариантов граничных условий приведены в таблице 4.13.

Таблица 4.13

*Расчетные значения средних температур на контрольных поверхностях модели*

№ расчетного случая	Этаж	Средняя температура стенки со стороны помещения, °С	Средняя температура стенки со стороны улицы, °С	Температура воздуха в зазоре на входе в панель, °С	Температура воздуха в зазоре на выходе из панели, °С	Средняя температура стенки в зазоре со стороны улицы, °С	Средняя температура стенки в зазоре со стороны помещения, °С	Средняя температура воздуха в зазоре, °С	Минимальная температура стенки со стороны помещения, °С
1	1	20,87	-30,72	24,13	20,47	20,71	16,49	22,30	19,45
	2	20,54	-31,46	20,47	17,46	18,56	14,55	18,97	18,27
	3	19,83	-31,40	17,46	14,57	16,25	12,33	16,02	15,40
2	1	24,17	-30,64	25,44	21,42	25,44	21,42	23,43	21,03
	2	21,83	-31,44	21,42	18,25	21,42	18,25	19,84	18,87
	3	22,02	-31,38	18,25	16,03	18,25	16,03	17,14	17,10
3	1	21,14	-30,69	24,73	22,39	22,10	18,84	23,56	20,16
	2	20,94	-31,44	22,39	20,04	21,17	17,95	21,22	19,74
	3	20,38	-31,36	20,04	18,77	19,17	16,18	19,41	17,80
4	1	20,86	-26,30	24,38	20,64	20,77	16,99	22,51	18,79
	2	20,60	-26,99	20,64	17,94	18,70	15,60	19,29	17,96
	3	20,00	-26,94	17,94	15,45	16,85	13,29	16,70	15,81
5	1	20,99	-21,90	24,48	20,95	21,31	17,90	22,72	19,61
	2	20,70	-22,53	20,95	18,16	19,49	16,09	19,56	18,45
	3	20,09	-22,49	18,16	16,09	17,13	14,09	17,13	16,17
6	1	21,04	-16,99	24,48	21,37	21,61	18,42	22,93	20,08
	2	20,79	-17,57	21,37	18,93	19,87	17,09	20,15	19,15
	3	20,25	-17,55	18,93	16,79	18,10	15,03	17,86	17,00

№ расчетного случая	Этаж	Средняя температура стенки со стороны помещения, °С	Средняя температура стенки со стороны улицы, °С	Температура воздуха в зазоре на входе в панель, °С	Температура воздуха в зазоре на выходе из панели, °С	Средняя температура стенки в зазоре со стороны улицы, °С	Средняя температура стенки в зазоре со стороны помещения, °С	Средняя температура воздуха в зазоре, °С	Минимальная температура стенки со стороны помещения, °С
7	1	21,10	-12,78	24,54	21,73	21,85	19,00	23,14	20,01
	2	20,85	-13,31	21,73	19,43	20,32	17,79	20,58	19,14
	3	20,34	-13,30	19,73	17,60	18,42	15,72	18,67	17,82
8	1	21,16	-8,48	24,59	22,01	22,08	9,60	23,30	20,22
	2	20,91	-8,95	22,01	19,86	20,66	18,47	20,94	19,63
	3	20,48	-8,95	19,86	18,33	18,99	16,68	19,10	18,03
9	1	21,19	-4,29	24,64	22,26	22,30	20,15	23,45	20,66
	2	20,98	-4,69	22,26	20,50	21,02	19,05	21,38	19,91
	3	20,63	-4,70	20,50	19,05	19,74	17,67	19,78	18,38
10	1	19,52	37,29	11,33	15,66	13,88	15,06	13,50	15,53
	2	20,34	37,69	15,66	17,75	16,24	17,12	16,71	18,53
	3	20,52	37,54	17,75	19,66	18,00	19,22	18,71	19,34

По результатам анализа определено, что разница значений минимальных температур на элементах стенки МФП со стороны помещения и температуры внутреннего воздуха в помещении для расчетных случаев №1, №4, №5 превышает допустимый предел в 4 °С, установленный санитарно-гигиеническими требованиями [67]. Таким образом, при температуре наружного воздуха ниже минус 18 °С следует предусматривать дополнительные мероприятия с целью обеспечения выполнения этих требований.

Определено, что при однократном воздухообмене и температуре наружного воздуха минус 32 °С, равной температуре наиболее холодной пятидневки [56], достаточно установки «теплого пола» удельной мощностью не менее 70 Вт/м<sup>2</sup>.

Также определено, что при этой же температуре наружного воздуха и двукратном увеличении воздухообмена температура внутренней стенки соответствует нормативной без применения устройства «теплого пола». Следует отметить, что увеличение кратности воздухообмена в здании и, соответственно, увеличение массового расхода в вентилируемом зазоре МФП менее эффективно, чем устройство теплого пола. Расчет приведенного сопротивления теплопередаче панели представлен в таблице 4.14.

Таблица 4.14

## Расчет приведенного сопротивления теплопередаче панели

№ расчетного случая	Этаж	Расчетный тепловой напор по воздуху, °С	Теплоемкость воздуха при средней температуре, Дж/(кг·°С)	Тепловой поток, Вт	Площадь теплообмена в зазоре, м <sup>2</sup>	Плотность теплового потока в зазоре суммарная, Вт/м <sup>2</sup>	Плотность теплового потока в направлении из помещения, Вт/м <sup>2</sup>	Плотность теплового потока суммарная, Вт/м <sup>2</sup>	Приведенное сопротивление теплопередаче панели, м <sup>2</sup> ·°С/Вт
1	1	3,66	1005	58,85	8,434	6,98	0,10	7,08	7,287
	2	3,01	1005	48,40	8,434	5,74	1,26	7,00	7,429
	3	2,89	1005	46,47	8,434	5,51	2,28	7,79	6,576
	$R_{\text{мфп}}, \text{м}^2 \cdot \text{°С} / \text{Вт}$								7,097
2	1	4,02	1005	64,64	8,434	7,66	1,15	8,81	6,221
	2	3,17	1005	50,97	8,434	6,04	1,32	7,37	7,229
	3	2,22	1005	35,70	8,434	4,23	3,11	7,35	7,268
	$R_{\text{мфп}}, \text{м}^2 \cdot \text{°С} / \text{Вт}$								6,906
3	1	2,34	1005	75,25	8,434	8,92	-0,61	8,31	6,236
	2	2,35	1005	75,58	8,434	8,96	-0,15	8,81	5,943
	3	1,27	1005	40,84	8,434	4,84	0,77	5,61	9,217
	$R_{\text{мфп}}, \text{м}^2 \cdot \text{°С} / \text{Вт}$								7,132
4	1	3,74	1005	60,14	8,434	7,13	0,06	7,19	6,561
	2	2,70	1005	43,42	8,434	5,15	1,21	6,36	7,485
	3	2,49	1005	40,04	8,434	4,75	2,01	6,75	6,950
	$R_{\text{мфп}}, \text{м}^2 \cdot \text{°С} / \text{Вт}$								6,999

№ расчетного случая	Этаж	Расчетный тепловой напор по воздуху, °С	Теплоемкость воздуха при средней температуре, Дж/(кг·°С)	Тепловой поток, Вт	Площадь теплообмена в зазоре, м <sup>2</sup>	Плотность теплового потока в зазоре суммарная, Вт/м <sup>2</sup>	Плотность теплового потока в направлении из помещения, Вт/м <sup>2</sup>	Плотность теплового потока суммарная, Вт/м <sup>2</sup>	Приведенное сопротивление теплопередаче панели, м <sup>2</sup> ·°С/Вт
5	1	3,53	1005	56,76	8,434	6,73	-0,20	6,53	6,572
	2	2,79	1005	44,86	8,434	5,32	0,77	6,09	7,098
	3	2,07	1005	33,29	8,434	3,95	1,89	5,83	7,301
	$R_{мфп}, м^2 \cdot °C/Вт$								6,990
6	1	3,11	1005	50,01	8,434	5,93	-0,36	5,57	6,832
	2	2,44	1005	39,24	8,434	4,65	0,59	5,24	7,323
	3	2,14	1005	34,41	8,434	4,08	1,37	5,45	6,936
	$R_{мфп}, м^2 \cdot °C/Вт$								7,031
7	1	2,81	1005	45,18	8,434	5,36	-0,48	4,88	6,943
	2	2,30	1005	36,98	8,434	4,39	0,34	4,72	7,233
	3	2,13	1005	34,25	8,434	4,06	1,22	5,28	6,366
	$R_{мфп}, м^2 \cdot °C/Вт$								6,848
8	1	2,58	1005	41,49	8,434	4,92	-0,59	4,33	6,841
	2	2,15	1005	34,57	8,434	4,10	0,16	4,26	7,012
	3	1,53	1005	24,60	8,434	2,92	0,95	3,87	7,612
	$R_{мфп}, м^2 \cdot °C/Вт$								7,155
9	1	2,38	1005	38,27	8,434	4,54	-0,71	3,83	6,652
	2	1,76	1005	28,30	8,434	3,36	-0,03	3,33	7,709
	3	1,45	1005	23,32	8,434	2,76	0,57	3,33	7,603
	$R_{мфп}, м^2 \cdot °C/Вт$								7,321
10	1	4,33	1005	69,63	8,434	8,26	3,59	4,66	3,811
	2	2,09	1005	33,61	8,434	3,98	2,61	1,37	12,634
	3	1,91	1005	30,71	8,434	3,64	1,61	2,04	8,358
	$R_{мфп}, м^2 \cdot °C/Вт$								8,268

На рисунке 4.34 представлен график зависимости общего сопротивления теплопередаче МФП и теплового потока в зазоре от наружной температуры.

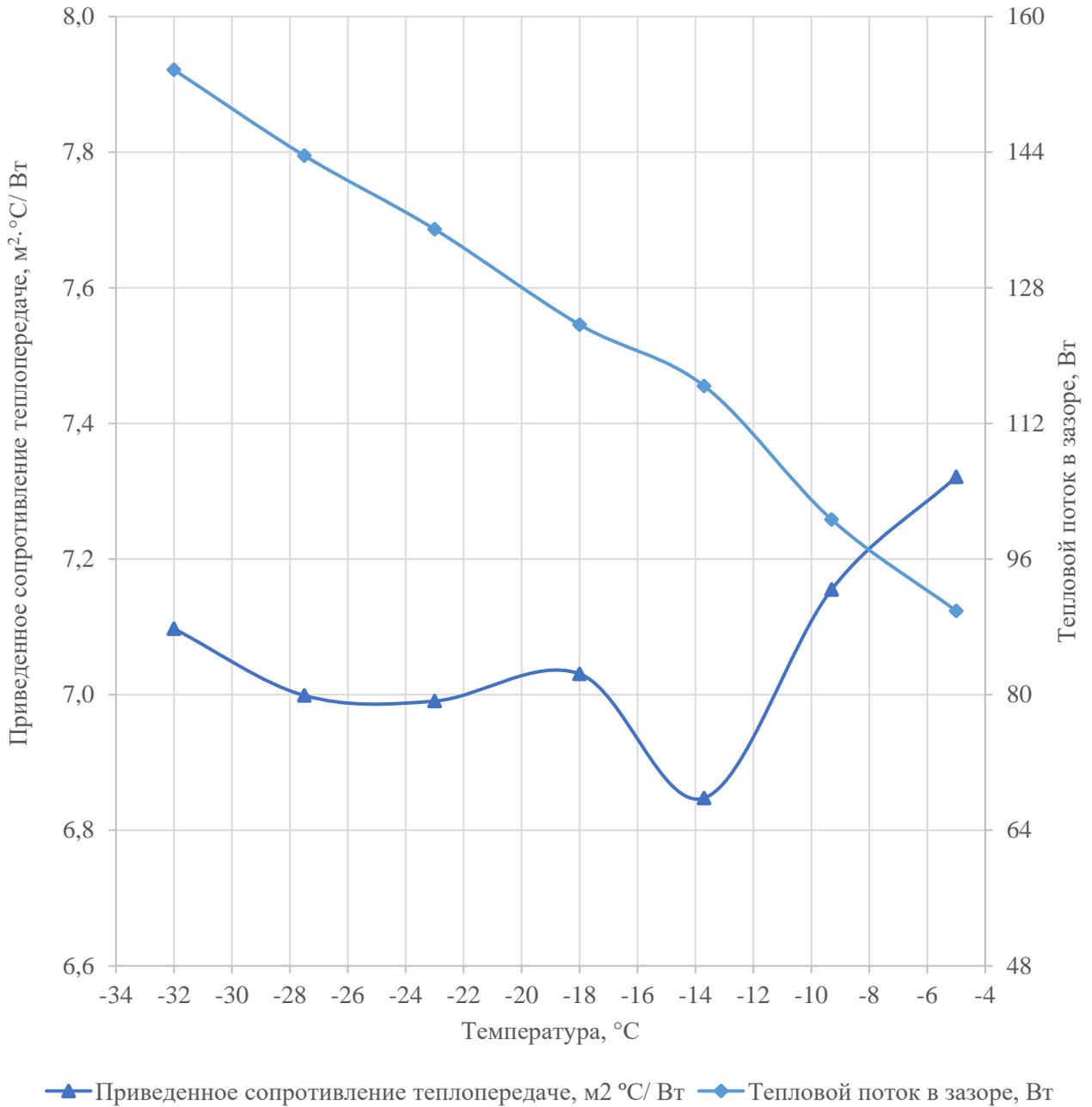


Рис. 4.34. График зависимости общего сопротивления теплопередаче МФП и теплового потока в зазоре от наружной температуры воздуха

На рисунках 4.35-4.38 показано распределение температур в МФП, помещении и на улице в зимний период (-13,7 °C). На рисунке 4.39, 4.40 показано распределение температур в несущем металлическом каркасе панели первого этажа.

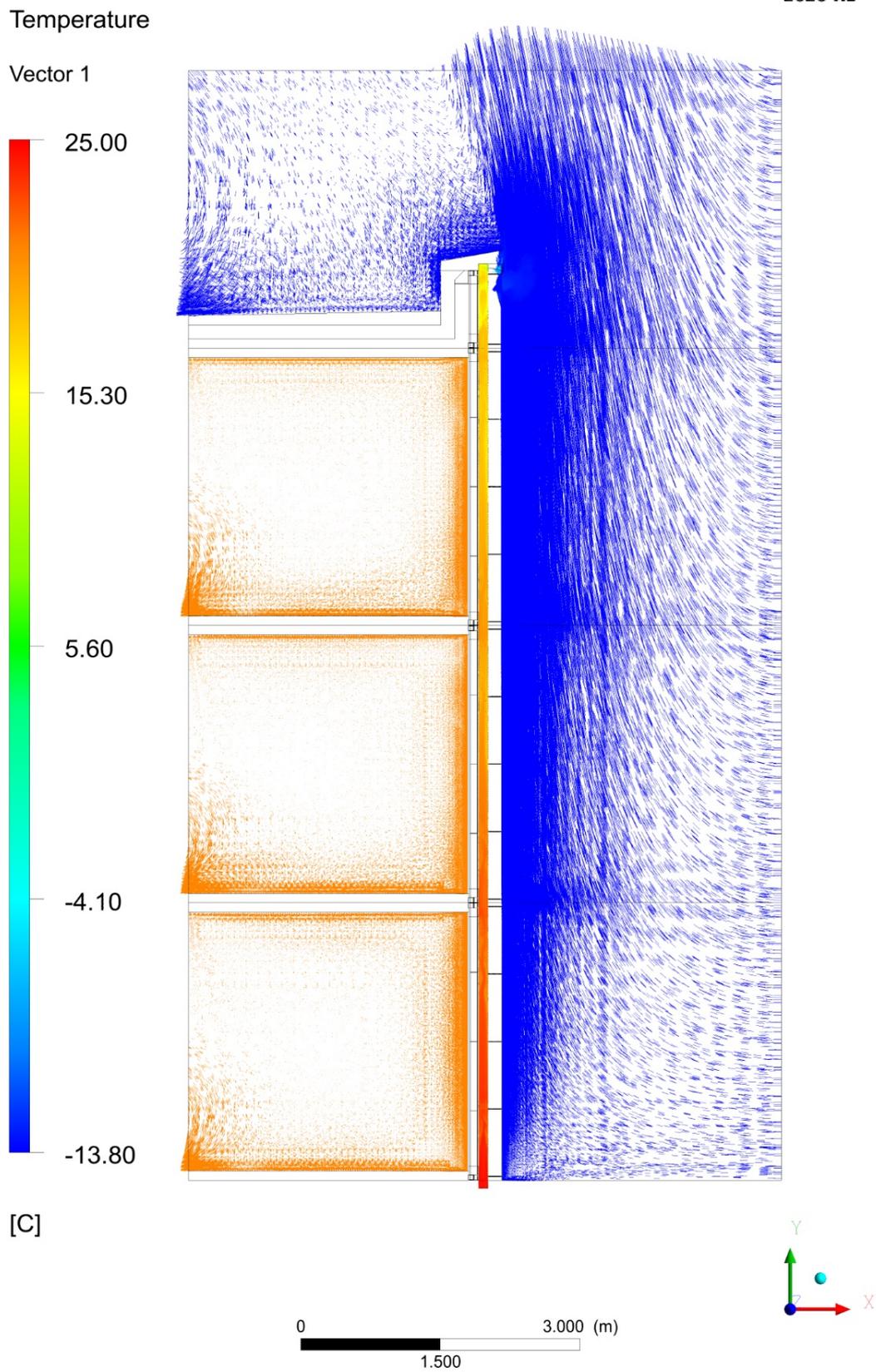


Рис. 4.35. Распределение температур воздуха в вентилируемом зазоре МФП, помещениях и на улице в зимний период (при наружной температуре минус 13,7 °С)

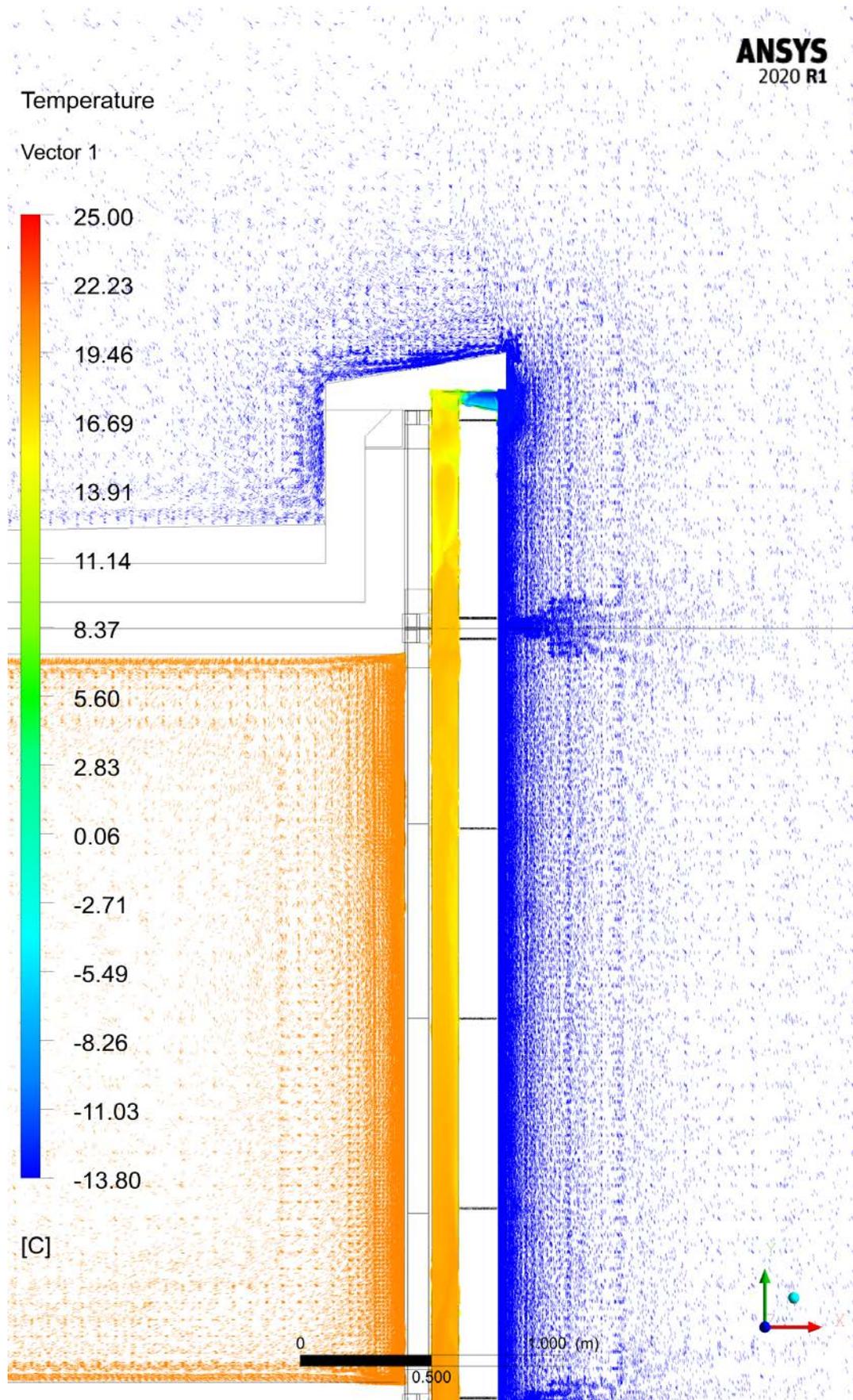


Рис. 4.36. Распределение температур воздуха в зоне парпета в вентилируемом зазоре МФП, помещениях и на улице в зимний период (при наружной температуре минус 13,7 °С)

Temperature

Contour 1



[C]

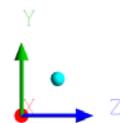
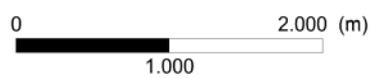
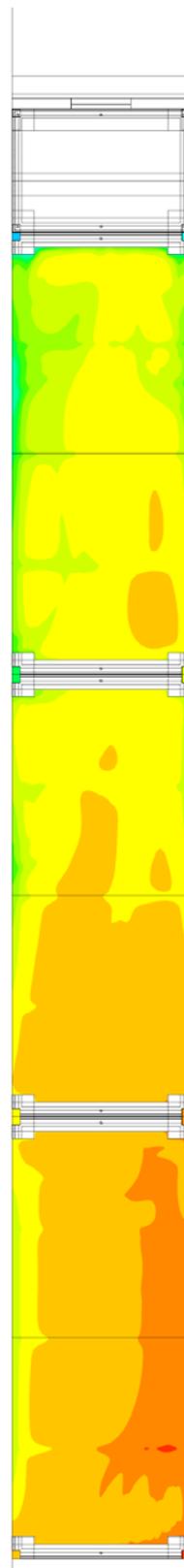


Рис. 4.37. Распределение температур воздуха в вентилируемом зазоре МФП, помещениях и на улице в зимний период (при наружной температуре минус 13,7 °С)

Temperature

Vector 1



[C]

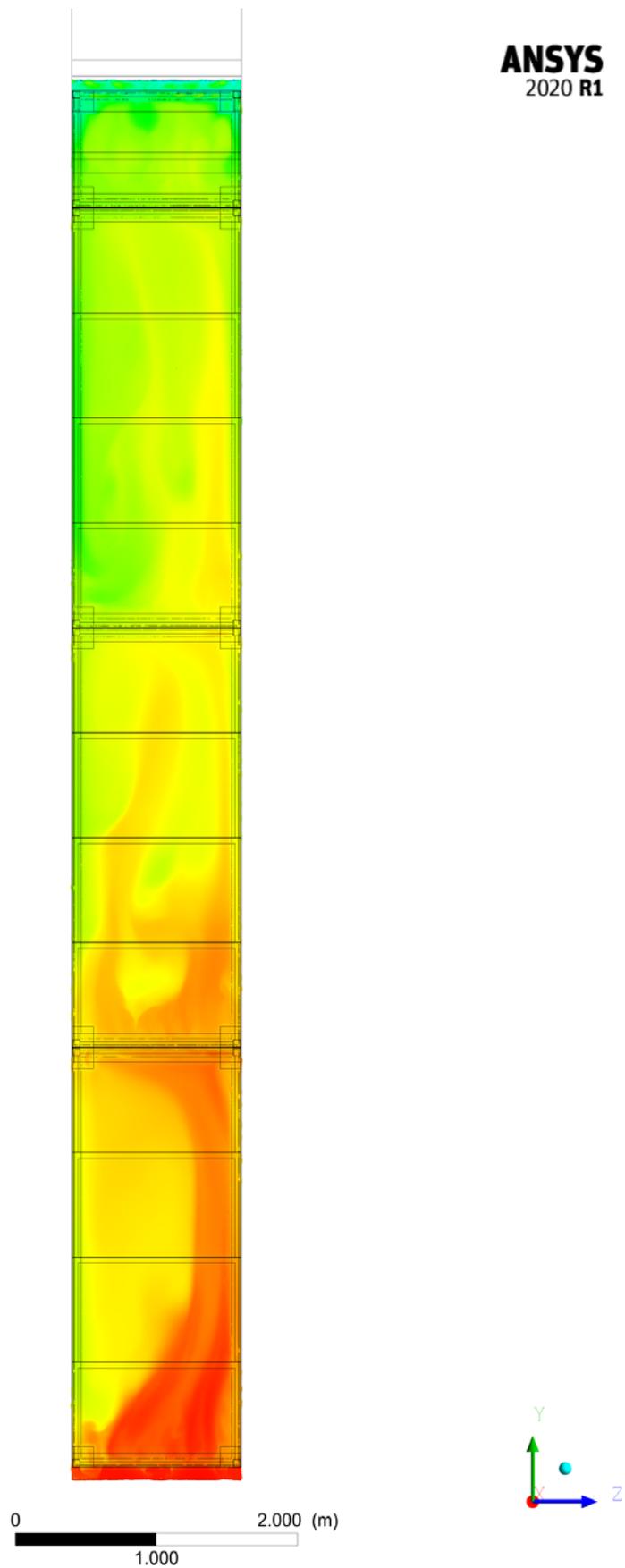


Рис. 4.38. Распределение температур воздуха в вентилируемом зазоре МФП в зимний период (при наружной температуре минус 13,7 °C)

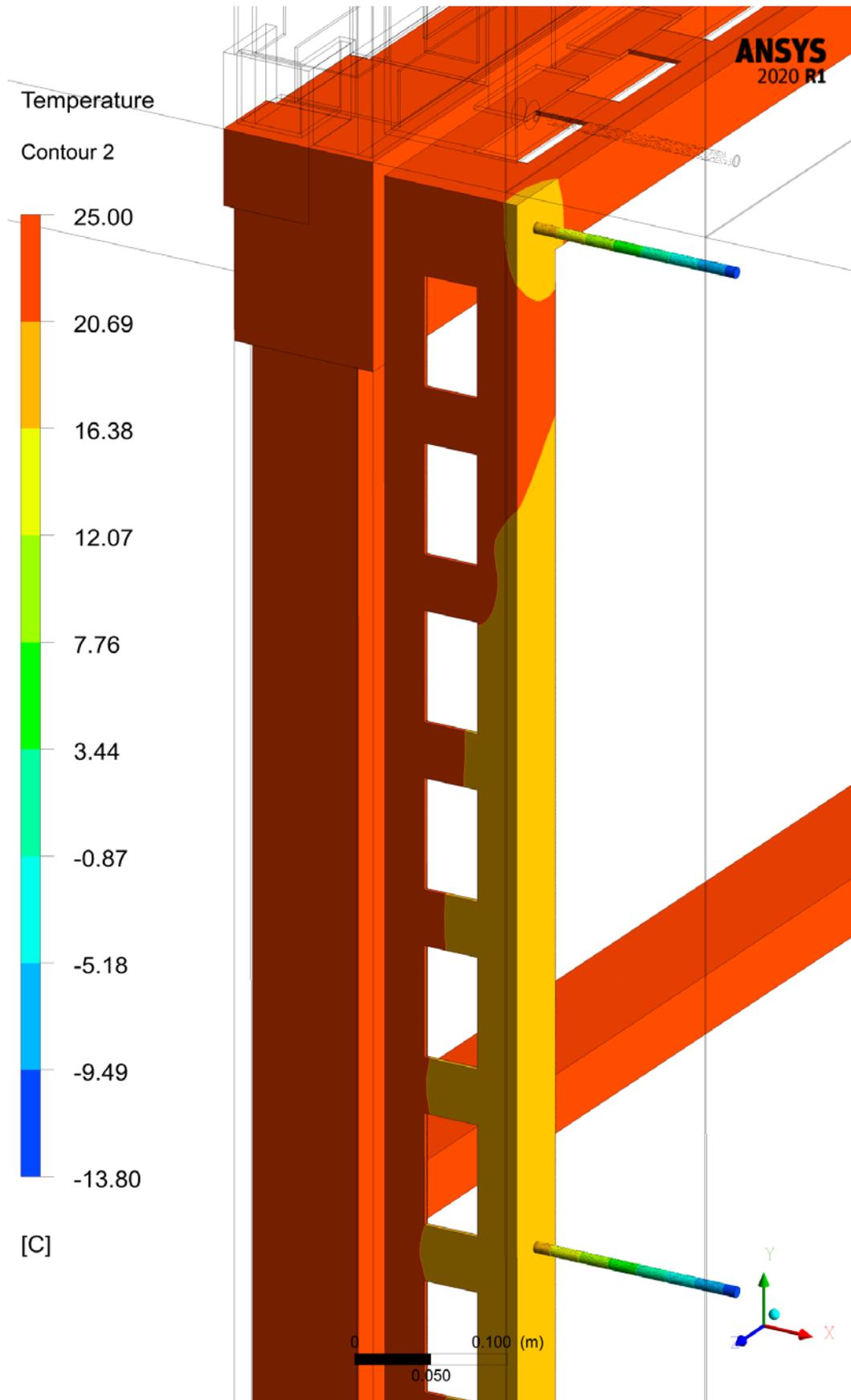


Рис. 4.39. Распределение температур в несущем каркасе МФП первого этажа

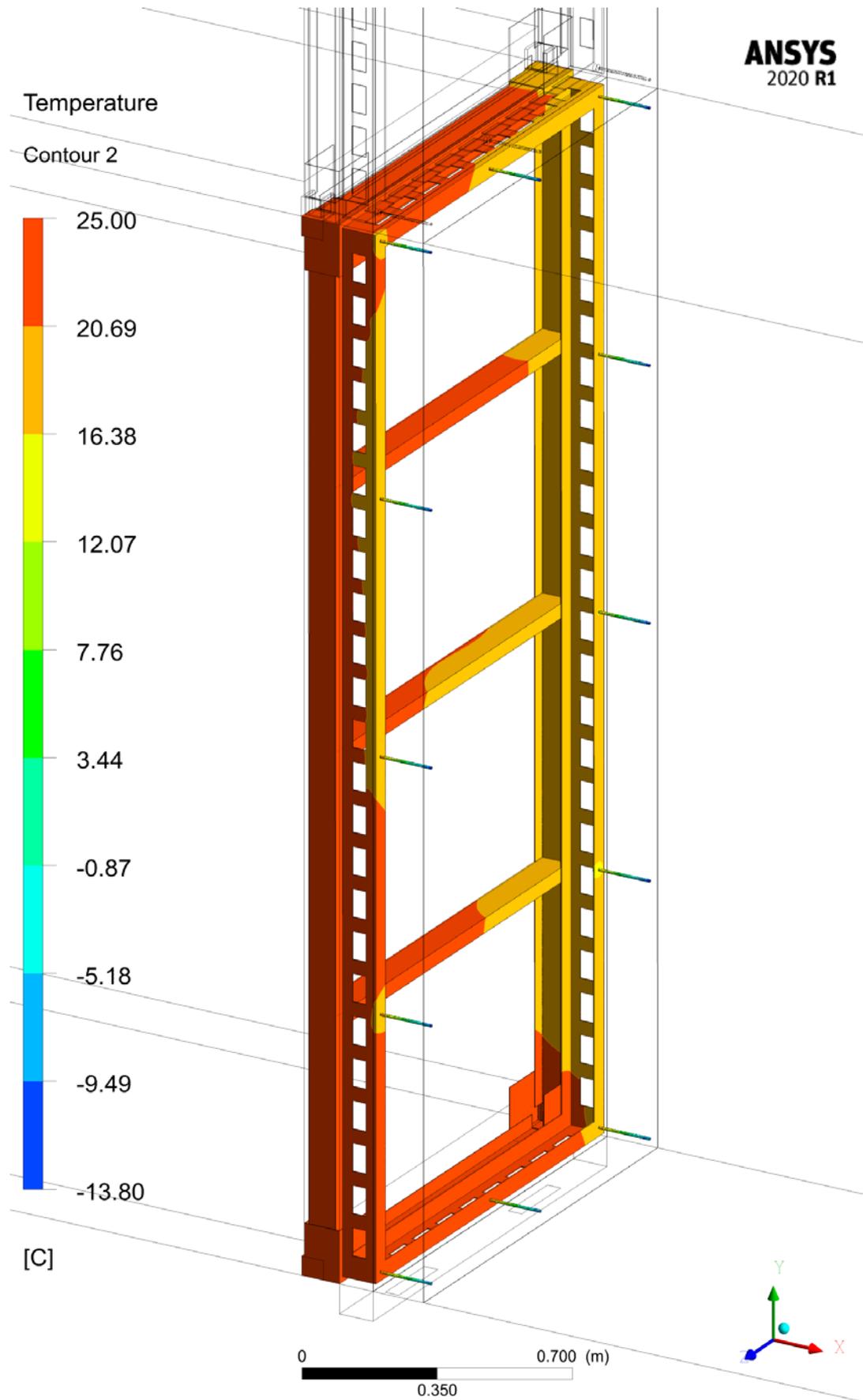


Рис. 4.40. Распределение температур в несущем каркасе МФП первого этажа

### 4.3 Выводы к главе 4

- Для определения оптимальных геометрических параметров создана параметрическая модель в программном комплексе ANSYS на примере фрагмента фасада трехэтажного жилого здания.
- Разработана методика определения толщин теплоизоляционных слоев и вентилируемого воздушного зазора панели, позволяющая производить подбор параметров для различных климатических условий.
- Разработана методика определения термического сопротивления панели при разных внешних условиях, позволяющая производить оценку эффективности применения фасада с МФП в различном климате.
- Определена требуемая кратность воздухообмена на входе в вентилируемый зазор МФП и удельная мощность «теплого пола» для разных температур наружного воздуха.

## Глава 5. АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МФП В ЗДАНИЯХ С КОМПЛЕКСОМ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

### 5.1 Описание объектов анализа

Для анализа эффективности солнечного и геотермального энергоснабжения здания с многослойными фасадными панелями были проанализированы три варианта исполнения многоквартирного трехэтажного жилого дома в городе Екатеринбурге:

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

Для подбора требуемой тепловой мощности инженерного оборудования здания для вариантов с МФП был проанализирован массив статистических данных Национального управления по авиации и исследованию космического пространства (NASA) по минимальным суточным температурам за 2020 год для Екатеринбурга [72]. Все значения температур за отопительный период разделены на диапазоны (рисунок 5.1)

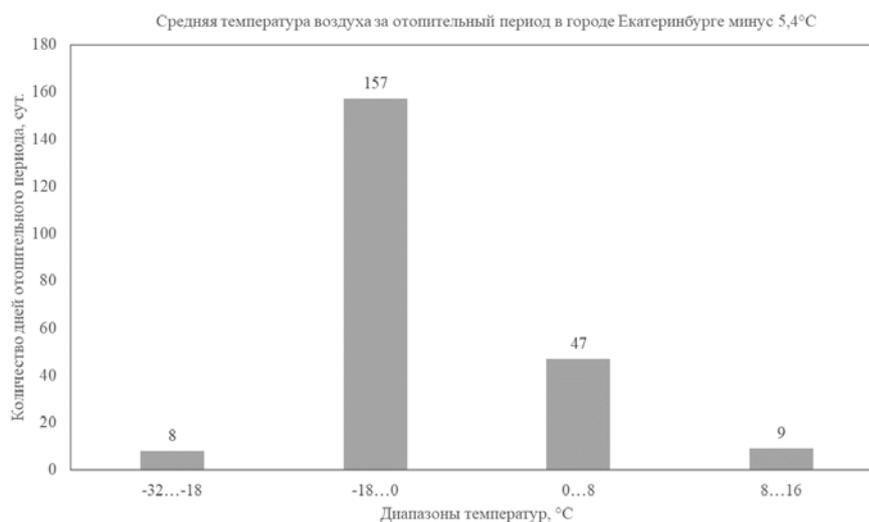


Рис. 5.1. Диаграмма температурных диапазонов за отопительный период для Екатеринбурга

### 5.1.1 Расчет горизонтального грунтового воздушного коллектора для зданий с многослойной фасадной панелью

Для предварительного подогрева приточного воздуха используется грунтовый коллектор, установленный на глубине 3-х метров. Параметры теплообменника рассчитывались для нагрева приточного воздуха при температуре улицы от минус 18 °С до 0 °С. Проблема промерзания грунта в зоне грунтового коллектора решается путем ежегодной промывки горячей водой в летний период [73-74]. В отопительный период грунтовый теплообменник используется только при отрицательных температурах окружающей среды.

В программном комплексе ANSYS был смоделирован фрагмент полиэтиленовой трубы с массивом грунта. Расчетная модель представлена на рисунках 5.3 и 5.4. В расчете принят влагонасыщенный суглинок с плотностью 1600 кг/м<sup>3</sup> и удельной теплоемкостью 1000 Дж/(кг·К). Толщина стенки полиэтиленовой трубы принята равной 9,8 мм для всех вариантов наружных диаметров.

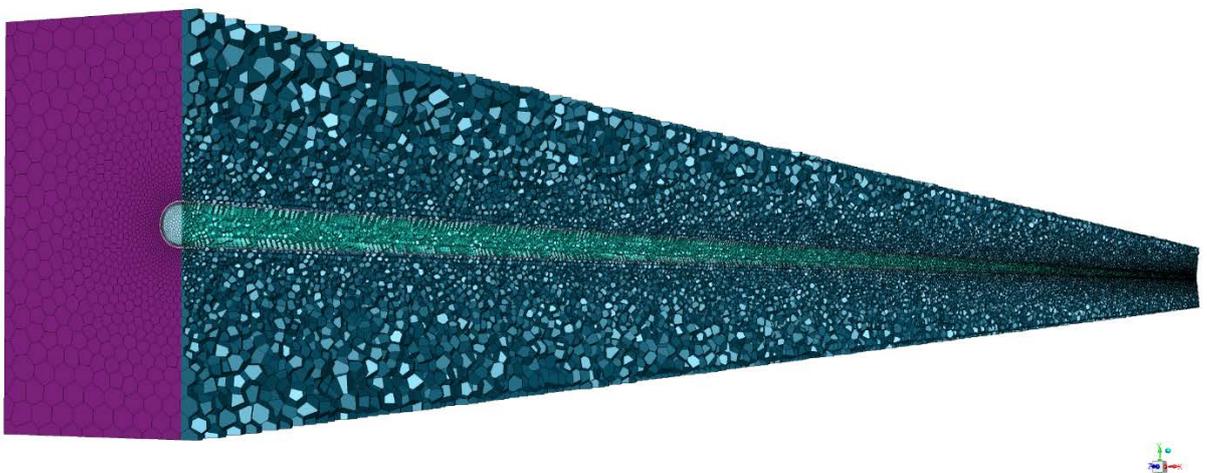


Рис. 5.3. Сетка расчетной модели грунтового коллектора в программном комплексе ANSYS

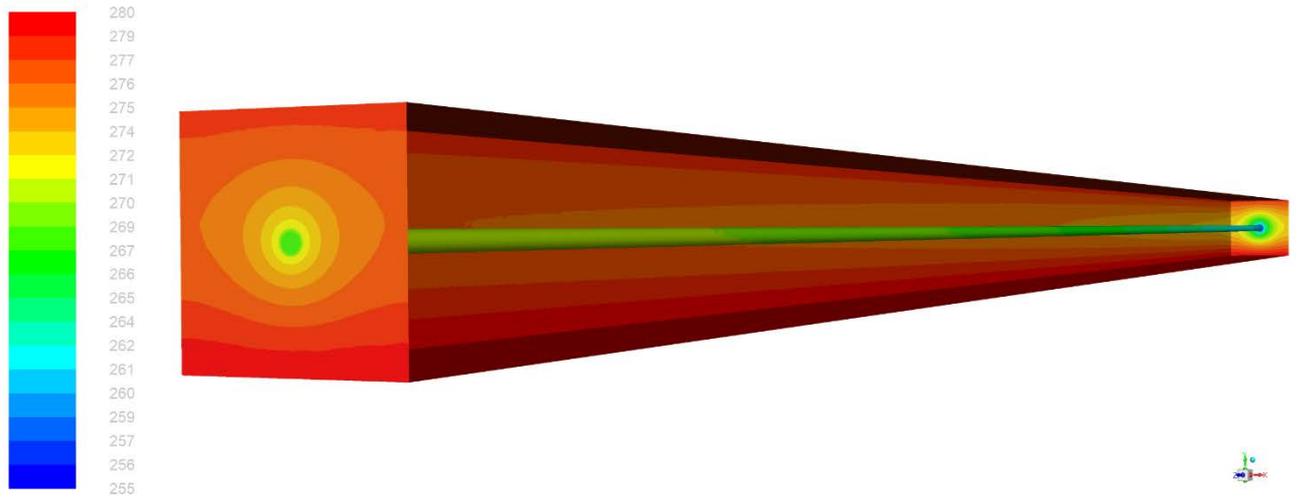


Рис. 5.4. Расчетная модель грунтового коллектора в программном комплексе ANSYS

Фрагмент модели в поперечном разрезе изображен условно на рисунке 5.5. Для окружающего грунта заданы температуры верхнего и нижнего слоя, равные  $5^{\circ}\text{C}$  и  $7^{\circ}\text{C}$  соответственно. На входе в трубу коллектора задана скорость воздуха с температурой минус  $18^{\circ}\text{C}$ . Скорость воздуха зависит от диаметра трубы и количества параллельных труб коллектора. Схема грунтового коллектора представлена на рисунке 5.6.

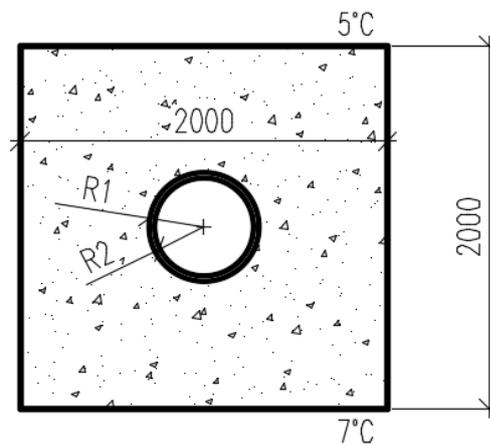


Рис. 5.5. Фрагмент модели в поперечном разрезе (условно)

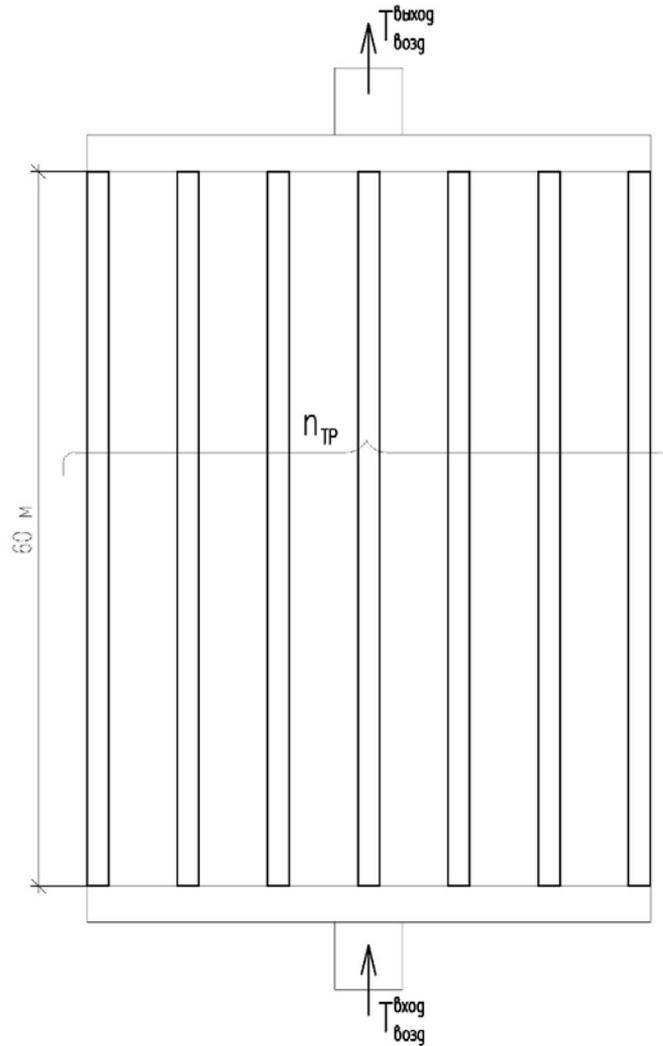


Рис. 5.6. Фрагмент модели в поперечном разрезе (условно)

Массовый расход воздуха через трубу коллектора определяется по формуле

$$Q_m^{TP} = \frac{Q \cdot \rho_{возд}}{3600 \cdot n_{TP}}, \quad (5.2)$$

где  $Q_m^{TP}$  – массовый расход через трубу коллектора, кг/с;

$\rho_{возд}$  – плотность воздуха, входящего в трубу, кг/м<sup>3</sup>;

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

$Q$  – объемный расход, м<sup>3</sup>/с.

Удельный теплосъем с погонного метра трубы коллектора определяется по формуле

$$q = \frac{Q_m^{TP} \cdot C_{\text{возд}} \cdot (T_{\text{возд}}^{\text{выход}} - T_{\text{возд}}^{\text{вход}})}{L}, \quad (5.3)$$

где  $q$  – удельный теплосъем, Вт/п.м;

$C_{\text{возд}}$  – удельная теплоемкость воздуха, входящего в трубу, Дж/(кг·К);

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

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

$L$  – длина трубы коллектора, м.

Скорость потока воздуха в трубе коллектора определяется по формуле

$$V^{TP} = \frac{4Q}{3600 \cdot 3,14 \cdot (D - 2t)^2 \cdot n_{TP}}, \quad (5.3)$$

где  $D$  – наружный диаметр трубы коллектора, м;

$t$  – толщина стенки трубы, м.

Таблица 5.1

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
6	0,4	18	0,07	0,46	255	273,68	18,68	23
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

Были проанализированы три варианта диаметров труб коллектора при разных значениях скоростей тока воздуха. Результаты расчетов по определению требуемых параметров грунтового коллектора представлены в таблице 5.1.

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.

### **5.1.2 Здание с многослойной фасадной панелью с использованием грунтового коллектора и теплового насоса**

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 каналный конденсационный осушитель.

Схема работы оборудования представлена на рисунке 5.7.

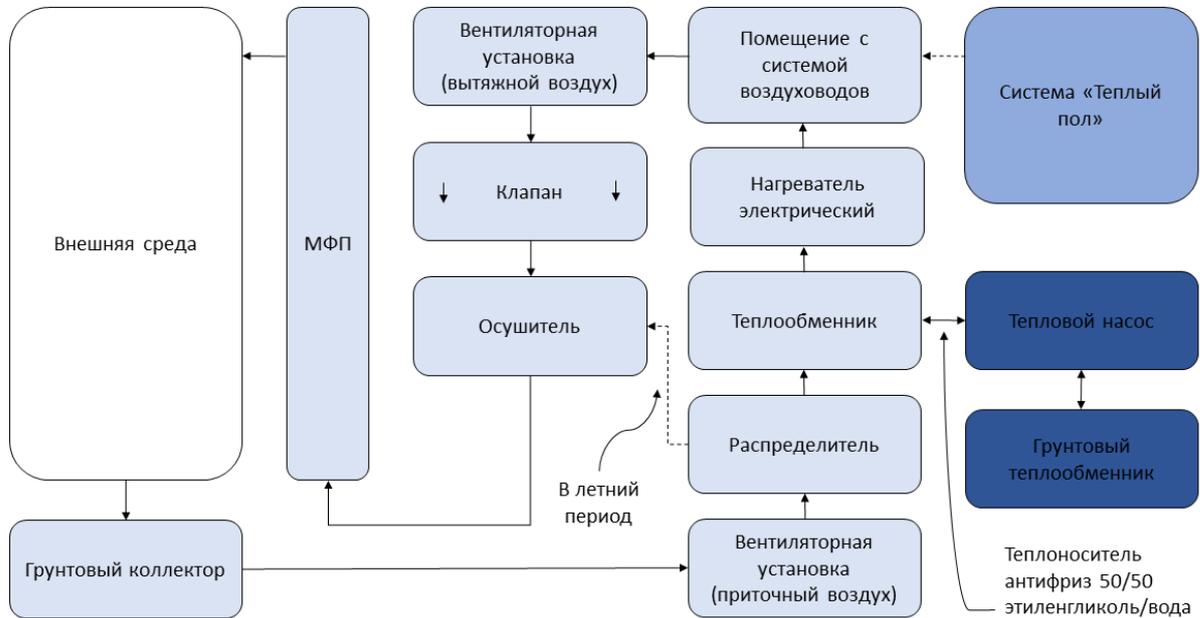


Рис. 5.7. Схема работы инженерного оборудования

### 5.1.3 Здание с многослойной фасадной панелью с использованием грунтового коллектора, теплового насоса и фотоэлектрических преобразователей

Данный вариант аналогичен первому; дополнительно добавлена фасадная солнечная сетевая электростанция общей максимальной мощностью 16,2 кВт. Описание и характеристики СЭС приведены в главе 3.

Солнечная электростанция функционирует без аккумуляторов.

В соответствии с действующим законодательством выработанную солнечными панелями энергию предписывается покупать энергоснабжающим организациям по оптовому тарифу [57].

При этом закон не содержит разрешения на взаимозачётную компенсацию выданной в сеть электроэнергии. В расчете экономической эффективности

рассмотрены два потенциально возможных варианта продажи выработанной энергии.

#### 5.1.4 Здание с традиционным вентилируемым фасадом, системой отопления, приточно-вытяжной системой вентиляции с рекуперацией тепла

В данном варианте 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. Схема работы инженерного оборудования представлена на рисунке 5.8.

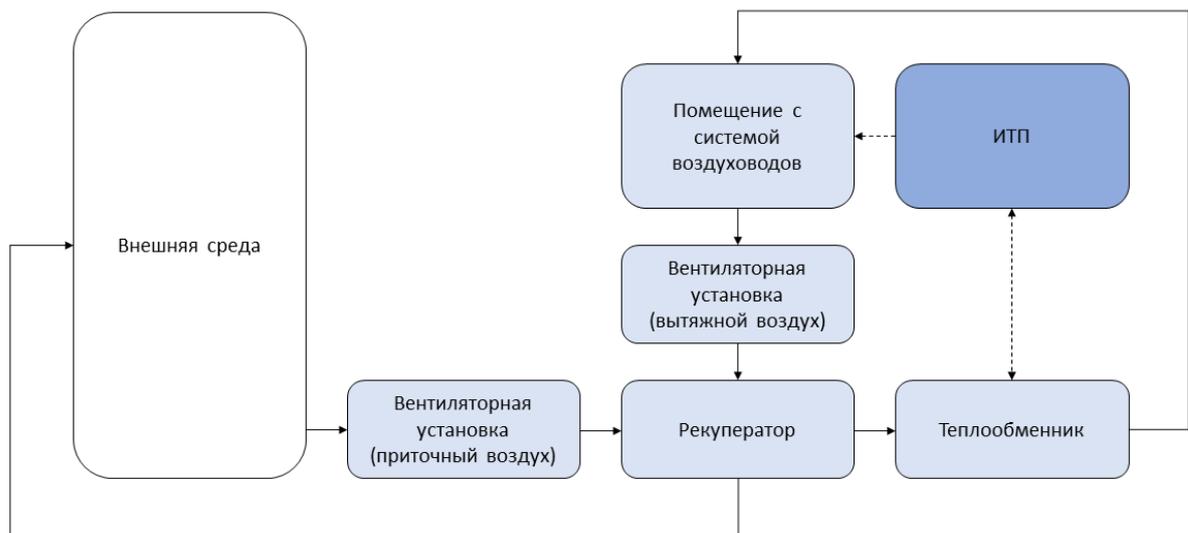


Рис. 5.8. Схема работы инженерного оборудования

## 5.2 Расчет сроков окупаемости

Для экономической оценки рассматриваемых вариантов использован метод чистого приведенного дохода NPV (Net Present Value). Для сравниваемых вариантов данный метод оценки является достаточно достоверным. К примеру,

популярный и подробный метод оценки EROI (energy returned on investment) показывает соотношение полученной энергии к затраченной на получение этого энергетического ресурса. Поскольку МФП состоит из материалов, используемых в традиционных вентилируемых фасадах, оценка затраченной энергии на производство материалов не является необходимой [75].

Суть метода заключается в оценке размера финансовых поступлений как результата вложений в инвестиционный проект с учетом сопутствующих затрат, то есть определения чистого дисконтированного дохода.

Оценка эффективности капитальных вложений основана на следующих принципах:

- Эффективность определяется обеспечением возврата исходной суммы инвестиций;
- Инвестируемый капитал и денежный поток приводятся к настоящему времени или к определенному расчетному году;
- Процесс дисконтирования денежных потоков и инвестиционных вложений производится по различным ставкам дисконта, зависящим от особенностей проекта.

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 [76-81].

Чистый приведенный доход рассчитывается по формуле

$$NPV = CF_0 + \frac{CF_1}{(1+r)^1} + \frac{CF_2}{(1+r)^2} + \dots + \frac{CF_n}{(1+r)^n} = \sum_{t=0}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t}, \quad (5.4)$$

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

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

Ожидаемый чистый денежный поток за установленный период времени определен как разница ежегодных эксплуатационных затрат на электрическую и тепловую энергию для сравниваемых вариантов.

Результаты расчетов сроков окупаемости приведены на рисунке 5.9.

Расчет полной стоимости реализации всех вариантов приведен в приложениях А-Ж.

При сумме первоначальных инвестиций для реализации варианта с МФП без ФЭП относительно традиционного варианта порядка 1,6 млн. руб. срок окупаемости составляет около десяти лет. Чистый дисконтированный доход (NPV) в конце расчетного периода составляет 3,5 млн. руб.

Для реализации варианта с МФП и ФЭП сумма первоначальных инвестиций относительно традиционного варианта составляет порядка 2,5 млн. руб. При продаже выработанной энергии солнечной электростанцией по оптовому тарифу 1,05 руб/(кВт·ч) срок окупаемости составляет около тринадцати лет. Чистый дисконтированный доход составляет 3,2 млн. руб.

При продаже выработанной энергии солнечной электростанцией по двухставочному тарифу (дневной тариф – 3,41 руб/(кВт·ч), ночной тариф – 1,62 руб/(кВт·ч)) срок окупаемости составляет около одиннадцати лет. Чистый дисконтированный доход составляет 4,2 млн. руб.

Таким образом, 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.

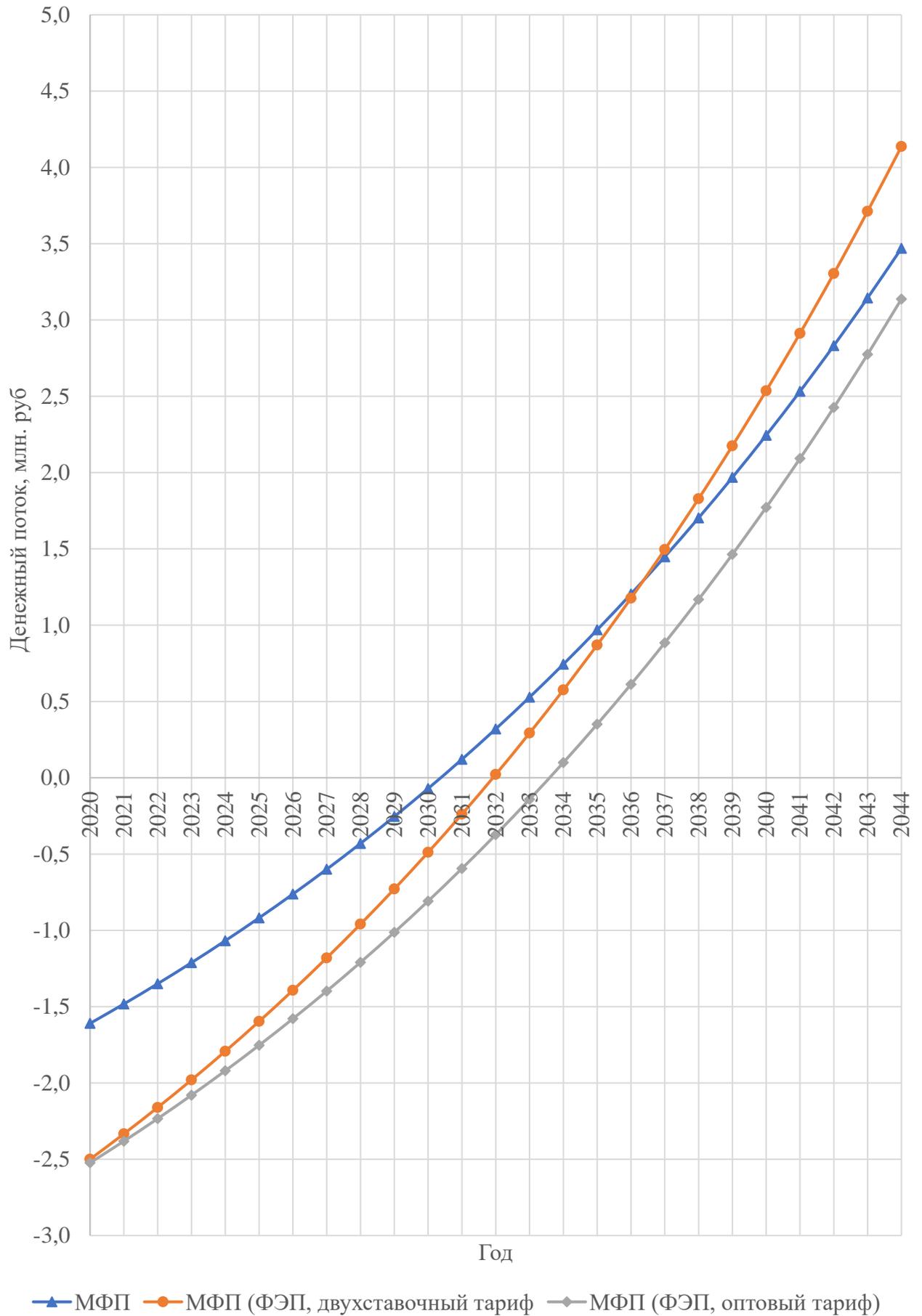


Рис. 5.9. График сроков окупаемости

### 5.3 Экономический и экологический анализ использования МФП в зданиях с солнечно-геотермальным энергоснабжением

Энергетический сравнительный анализ показал, что при варианте 1 с использованием МФП, теплового насоса и грунтового теплообменника 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 фасадной сетевой солнечной электростанции позволяет снизить энергопотребление на 40% (86 652 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 5.10.

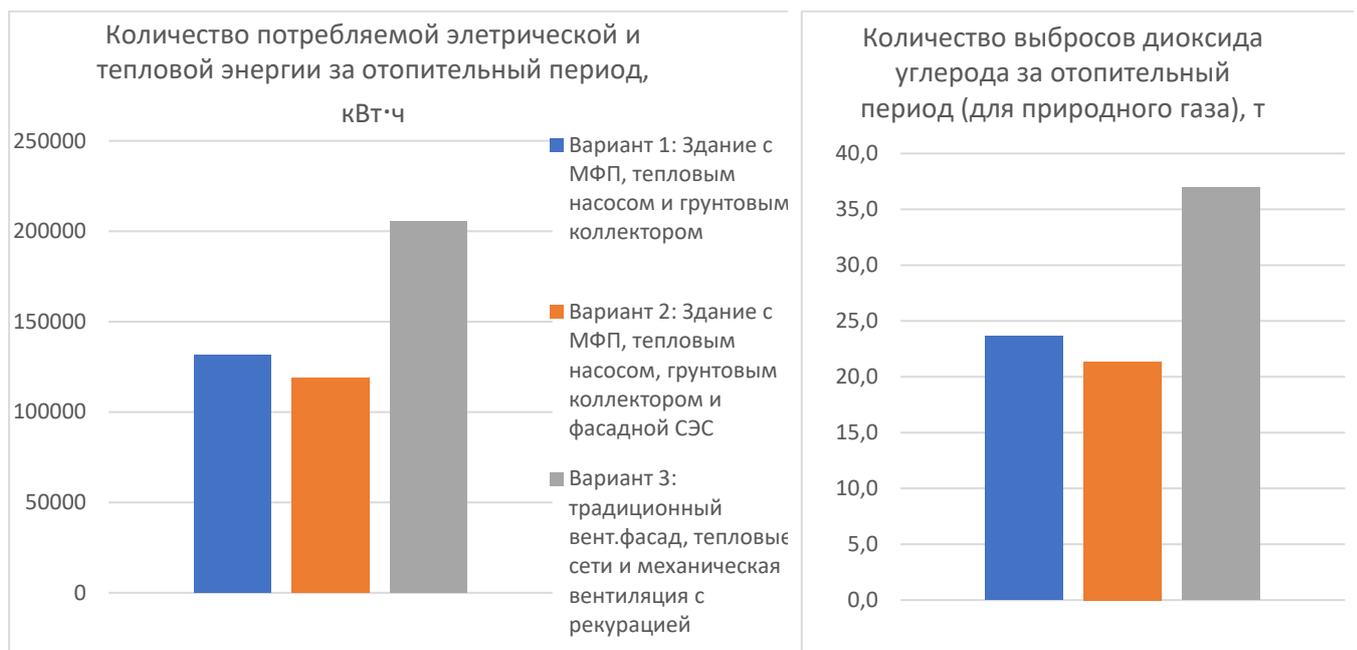


Рис. 5.10. Диаграмма потребляемой энергии и количества выбросов парниковых газов за отопительный период для трех вариантов исполнения зданий

## 5.4 Выводы к главе 5

- Проведенный расчет показал экономическую эффективность использования МФП для ограждающих конструкций относительно вентилируемого фасада для зданий с приточно-вытяжной системой вентиляции.
- Исследования эффективности воздушного грунтового коллектора показывают зависимость диаметра труб от удельного теплосъема.
- Энергетический сравнительный анализ показал, что при варианте 1 с использованием МФП, теплового насоса и грунтового теплообменника 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 фасадной сетевой солнечной электростанции позволяет снизить энергопотребление на 40% (86 652 кВт·ч) относительно варианта 3.
- Анализ потенциала интегрированной солнечной электростанции при продаже электроэнергии по двухставочному тарифу, а также использование геотермальной энергии для подогрева приточного воздуха, показывает эффективность применения ВИЭ для зданий в умеренно континентальном климате.
- Применение ФЭП в зданиях с МФП при продаже электроэнергии по оптовому тарифу менее эффективно, чем здание с МФП без солнечных панелей.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненной работы:

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.

**Рекомендации, перспективы дальнейшей разработки темы.**

Диссертационное исследование имеет важное научно-практическое значение для технологий использования возобновляемых источников энергии для энергоснабжения зданий, а также технологий энергосбережения. Результаты диссертационной работы позволяют зарегистрировать патент на изобретение разработанной системы энергоснабжения зданий с использованием грунтового коллектора.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. World population growth. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://ourworldindata.org/world-population-growth> (дата обращения: 04.02.2020).
2. Carbon dioxide and other greenhouse emissions. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions> (дата обращения 04.02.2020).
3. Average temperature anomaly. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://ourworldindata.org/grapher/temperature-anomaly/> (дата обращения: 04.02.2020).
4. Бенуж, А.А. Анализ концепции зеленого строительства как механизма по обеспечению экологической безопасности строительной деятельности / А.А. Бенуж, М.А. Колчигин // Вестник МГСУ. - 2012.- №12.- с. 161-165.
5. 2020 Energy Strategy. Energy 2020: A strategy for competitive, sustainable and secure energy. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1409650806265&uri=CELEX:52010DC0639> (дата обращения: 04.02.2020).
6. 2050 Energy Strategy. Energy roadmap 2050. [Электронный ресурс] – Режим доступа: [https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/2012\\_energy\\_roadmap\\_2050\\_en\\_0.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/2012_energy_roadmap_2050_en_0.pdf) (дата обращения: 04.02.2020).
7. Министерство Энергетики РФ: основные характеристики российской электроэнергетики [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://minenergo.gov.ru/node/532> (дата обращения: 13.09.2021).

8. Комолова, М.Н. Роль возобновляемых источников энергии в российской и европейской системах энергоснабжения. / М.Н. Комолова // Энергосбережение. - 2007. №7. – с.68-76.

9. Распоряжение Правительства РФ от 13.11.2009 №1715-р «Об Энергетической стратегии России на период до 2030 года». [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_94054/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_94054/) (дата обращения: 04.02.2020).

10. Лукутин, Б.В. Влияние возобновляемой энергетики на энергетическую безопасность децентрализованных систем электроснабжения / Б.В. Лукутин, В.Р. Киушкина // Журнал СФУ. Техника и технологии. – 2020. №5. – С.632-642.

11. Shepvalova, O.V. Energy saving, implementation of solar energy and other renewable energy sources for energy supply in rural areas of Russia / O.V.Shepvalova // Energy Procedia. - 2015. №74. P.1551-1560.

12. Соловьев, А.А. Становление современной возобновляемой энергетики и ее роль в развитии строительной индустрии / А.А. Соловьев // Вестник МГСУ. – 2016. №6. – С.5-6.

13. Бердин, В.Х. Возобновляемые источники энергии в изолированных населенных пунктах Российской Арктики / В.Х.Бердин, А.О.Кокорин, Юлкин Г.М., Юлкин М.А. – М.: Всемирный фонд дикой природы (WWF). - 2017. – 88 с.

14. Solar PV module prices, 1976 to 2016. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://ourworldindata.org/grapher/solar-pv-prices>. (дата обращения: 27.04.2020).

15. Дмитриев А.Н. Энергосберегающие ограждающие конструкции гражданских зданий с эффективными утеплителями: дис. ... д-ра техн.наук: 05.23.01/ Дмитриев Александр Николаевич. – М., 1999. – 373 с.

16. Шарипов, А.Я. Энергосберегающие и энергоэффективные технологии – основа энергетической безопасности / А.Я. Шарипов, В.М. Силин // АВОК. – 2006. №4. – С.4-8.
17. Мартиросов С.Н. Разработка метода выбора параметров комбинированных ветро-фотоэлектрических энергоустановок для автономного сельского дома: дис. ... канд. техн.наук: 05.14.08/ Мартиросов Сергей Наполеонович. – М., 2001. – 138 с.
18. Стребков, Д.С. Инновационные энергетические технологии / Д.С. Стребков // АВУ. – 2009. - №4. – с. 76-80.
19. Strebkov, D. Solar power engineering in the future world: A view from Russia / D. Strebkov // Applied Solar Energy. – 2012. №48 (2). p.71-75.
20. Бутузов В.А. Повышение эффективности систем теплоснабжения на основе использования возобновляемых источников энергии: дис. ... д-ра техн.наук: 05.14.08/ Бутузов Виталий Анатольевич. – М., 2004. – 297 с.
21. Бутузов, В.А. Геотермальная система теплоснабжения с использованием солнечной энергии и тепловых насосов / В.А. Бутузов, Г.В. Томаров, В.Х. Шетов // Энергосбережение. - 2008.- №3. - с. 68-72.
22. Бутузов, В.А. Российская геотермальная энергетика: анализ столетнего развития научных и инженерных концепций / В.А. Бутузов // Окружающая среда и энерговедение (ОСЭ). - 2019.- №3. - с. 4 -21.
23. Елистратов В.В. Возобновляемая энергетика – 3-е изд., доп. – СПб: Изд-во Политехн. Ун-та, 2016. – 424 с.
24. Елистратов, В.В. Умная энергетика для Крайнего Севера / В.В. Елистратов // Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE). – 2017. - №1-3. - с.157.
25. Щеклеин, С.Е. Надежное энергоснабжение с использованием ВИЭ / С.Е. Щеклеин, А.И. Попов // СОК. – 2018. - №6.

26. Щеклеин, С.Е. Гелиосистема с сезонным аккумулятором теплоты / С.Е. Щеклеин, В.М. Пахалуев, А.В. Матвеев // Альтернативная энергетика и экология ISJAEE. – 2018. - №1-3. С.17-25.
27. Возобновляемая энергетика и энергосбережение: учебник / В.И. Велькин, Я.М. Щелоков, С.Е. Щеклеин и др. – Екатеринбург: УрФУ, 2020. – 312 с.
28. Пахалуев В.М. Применение нетрадиционных и возобновляемых источников в системах теплоснабжения: учебное пособие / В.М. Пахалуев, С.Е. Щеклеин. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2008. 46 с.
29. Velkin, V. The use of solar energy for residential buildings in the capital city /V. Velkin, S. Shcheklein, V. Danilov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2017. №72.
30. Велькин В.И. Методология оптимизации параметров микрогенерирующих энергокомплексов на основе возобновляемых источников энергии: дис. ... д-ра техн.наук: 05.14.08/ Велькин Владимир Иванович. – СПб., 2018. – 294 с.
31. Безруких П.П. Научно-техническое и методологическое обоснование ресурсов и направлений использования возобновляемых источников энергии: дис. ... д-ра техн.наук: 05.14.08/ Безруких Павел Павлович. – М., 2003. – 268 с.
32. Энергоактивные здания / Н.П. Селиванов, А.И. Мелуа, С.В. Золокей и др. – М.: Стройиздат, 1988. – 376 с.
33. Сахаров А.Н. Жилые дома для сельского строительства на севере / А.Н. Сахаров. – Л.: Стройиздат, 1984. – 260 с.
34. Сахаров А.Н. Архитектурное проектирование малоэтажных жилых домов с солнечным энергообеспечением / А.Н. Сахаров, И.И. Анисимова. – М.: МАРХИ, 1983. – 64 с.

35. Алхасов А.Б. Возобновляемые источники энергии: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности 140202 / А.Б. Алхасов. – М.: Изд.дом МЭИ, 2011. – 269 с.

36. Алхасов А.Б. Освоение низкопотенциального геотермального тепла / А.Б. Алхасов, Д.А. Алхасова, М.Г. Алишаев; под общ. ред. В.Е. Фортова. – М.: Физматлит, 2012. – 280 с.

37. Брянцева Е.В. Исследования комбинированной системы теплоснабжения на основе геотермальной и солнечной энергии: дис. ... канд. техн.наук: 05.14.08/ Брянцева Елена Витальевна. – М., 2016. – 107 с.

38. Сидельников А.И. Разработка методики технико-экономического обоснования структуры и параметров энергокомплекса на базе возобновляемых источников энергии: дис. ... канд. техн.наук: 05.14.08/ Сидельников Андрей Иванович. – М., 2006. – 121 с.

39. Тихонов А.В. Повышение эффективности комбинированных систем автономного электроснабжения на основе возобновляемых источников энергии: дис. ... канд. техн.наук: 05.14.08/ Тихонов Антон Валентинович. – М., 2013. – 169 с.

40. Афонин В.С. Совершенствование методов обоснования и оптимизации автономных энергокомплексов на базе теплового насоса, солнечных коллекторов и фотоэлектрических модулей: дис. ... канд. техн.наук: 05.14.08/ Афонин Вячеслав Сергеевич. – М., 2014. – 113 с.

41. Ко А. Исследование эффективности использования энергокомплексов на основе солнечных и теплонасосных установок в региональной энергетике Мьянмы: дис. ... канд. техн.наук: 05.14.08/ Аунг Ко. – М., 2019. – 163 с.

42. Низовцев М.И. Тепло- и массоперенос в энергоэффективных ограждающих конструкциях и климатическом оборудовании зданий: дис. ... д-ра техн. наук: 01.04.14/ Низовцев Михаил Иванович. – Новосибирск, 2011. – 319 с.

43. Низовцев, М.И. Экспериментальное исследование влагопереноса в теплоизоляционной панели с вентилируемыми каналами / М.И. Низовцев, В.Ю. Бородулин, В.Н. Летушко, А.Н. Стерлягов // Ползуновский Вестник. – 2017. - №4. с.118-122.
44. Низовцев, М.И. Экспериментальные исследования процессов тепло- и влагообмена в теплоизоляционных панелях / М.И. Низовцев, В.Ю. Бородулин, В.Н. Летушко, А.Н. Стерлягов // Ползуновский Вестник. – 2019. - №2. с.113-118.
45. Новиков, В.А. Энерго- и ресурсосбережение в агропромышленном комплексе. Взгляд архитектора / В.А. Новиков // Энергосбережение. – 2019. – №2. – с.4-6.
46. Брызгалин, В.В. Использование пассивных систем солнечного отопления как элемента пассивного дома / В.В. Брызгалин, А.К. Соловьев // Вестник МГСУ. – 2018. - №4 (115). - С.472-481.
47. Алехин, В.Н. Многослойные панели для эффективных зданий с солнечно-геотермальным энергоснабжением / В.Н. Алехин, Е.П. Шароварова, С.Е. Щеклеин, А. Хуссейн, Н.Е. Новоселова // Академический Вестник УралНИИПроект. – 2021. - №2. – с. 38-44.
48. Дербина С.Н. Эволюция конструктивных решений светопрозрачных фасадах /С.Н. Дербина, П.В. Борискина, А.А. Плотников // Вестник МГСУ. – 2011. - №2-2. – с.26-35.
49. Ghaffarianhoseini A. Exploring the advantages and challenges of double-skin facades (DSFs) / Ali Ghaffarianhoseini, Amirhosein Ghaffarianhoseini, Umberto Berardi, John Tookey, Danny Hin Wa Li, Shahab Kariminia // Renewable and Sustainable Energy. – 2016. -№60. –p.1052-1065.
50. Renewable Energy Sources Act. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.bmwi.de/Redaktion/EN/Artikel/Energy/electircity-price-components-state-imposed.html> (дата обращения: 26.09.2020).

51. Рекомендации по оценке эффективности систем сбора низкопотенциального тепла грунта для целей теплоснабжений зданий/ НИИСФ Госстроя СССР. – М.: Стройиздат, 1988. -16 с.
52. Строительная климатология / НИИ строит.физики. – М.: СТройиздат, 1990, 86 с.: ил. – (Справочное пособие к СНиП).
53. СНиП 2.01.01-82 Строительная климатология и геофизика / Госстрой СССР. – М.: СТройиздат, 1983. – 136 с.
54. Многослойная фасадная панель: пат.191998 Рос.Федерация: МПК E04F 13/075, E04F 13/077/ Алехин В.Н., Шароварова Е.П., Бударин А.М.; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина». – N 2018141862; заявл. 28.11.2018; опубл.29.08.2019, Бюл. N 25.
55. 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.
56. СП 131.13330.2018. Свод правил. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99.
57. Российская Федерация. Законы. Об электроэнергетике [Текст]: федер. Закон: [принят Гос. Думой 21 февраля 2003 г.: одобр. Советом Федерации 12 марта 2003 г.].
58. 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.
59. 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.

60. Контроллер заряда для солнечных батарей DELTA Solar Series серия МРРТ. Руководство пользователя. - 20 с.

61. СП 20.13330.2016. Свод правил. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85\* (с Изменениями №1,2).

62. ANSYS 2020 R1:Help / ANSYS Mechanical User's Guide. – 2020.

63. СП 16.13330.2017. Свод правил. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81\* (с Поправкой, с Изменениями №1,2).

64. 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).

65. ANSYS 2020 R1:Help / ANSYS Fluent in ANSYS Workbench User's Guide. – 2020.

66. ANSYS 2020 R1:Help / ANSYS Fluent User's Guide. – 2020.

67. СП 50.13330.2012. Свод правил. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003 (с Изменением №1).

68. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 1976. – 280 с.

69. Банди Б. Методы оптимизации. Вводный курс / Б. Банди. - М.: Радио и связь, 1988. - 128 с.

70. Ларин Р.М. Методы оптимизации. Примеры и задачи: учеб. пособие / Р.М. Ларин, А.В. Плясунов, А.В. Пяткин // Новосибирск: Новосиб. Ун-т., 2003. – 115 с.

71. ГОСТ 8240-97. Швеллеры стальные горячекатанные. Сортамент (с Изменением №1).
72. Global temperature. Climate data. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://climate.nasa.gov/> (дата обращения: 05.03.2020).
73. Филатов, С.О. Работа теплообменников утилизации теплоты грунта / С.О. Филатов, В.И. Филатов // Труды БГТУ. Химия и технология неорганических веществ. – 2011. - №3. – с.179-184.
74. Васильев, Г.П. Геотермальные теплонасосные системы теплоснабжения и эффективность их применения в климатических условиях России / Г.П. Васильев // АВОК. – 2007. -№5. С. 58-73.
75. Ferroni F. Energy Return or Energy Invested (ERoEI) for photovoltaic solar systems in regions of moderate insolation / F. Ferroni, R.J. Hopkirk // Energy Policy. – 2016. - №94. – p.336-344.
76. Графова Г.Ф. Дисконтированный экономический эффект как основной показатель для оценки инвестиционных проектов / Г.Ф. Графова // Инновации. – 2006. - №3(90). – с.106-108.
77. Броневиц Ю.С. Оценка экономической эффективности инвестиций / Ю.С. Броневиц // Вестник КамчатГТУ. – 2010. - №14. – с.35-42.
78. Хорев А.И. К вопросу о критериях и показателях эффективности инвестиций / А.И. Хорев, В.И. Бербенец // Российское предпринимательство. – 2009. - №4. – с.70-76.
79. Макеева Ф.С. Государственная инвестиционная политика: учебное пособие / Ф.С. Макеева. – Ульяновск: УлГУ, 2015. – 68 с.
80. Теплова Т.В. Инвестиции: учебник / Т.В. Теплова. – М.: Издательство Юрайт, 2011. – 724 с.
81. Уильям Ф.Шарп. Инвестиции /Шарп Уильям, Александер Гордон, Бэйли Джеффри. – М.: Инфра-М, 1999. – 1028 с.

### Приложение А. ИСХОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ: РАЗМЕРЫ, ОБОРУДОВАНИЕ, МАТЕРИАЛЫ, ТАРИФЫ

Наименование параметра	Единица измерения	Вариант 1, 2 (МФП, тепловой насос, СЭС)	Вариант 3 (Вентилируемый фасад)
<b>Расчетные климатические условия</b>			
Город		Екатеринбург	Екатеринбург
Расчетная температура внутреннего воздуха	°С	21	21
Расчетная температура наружного воздуха (наиболее холодной пятидневки)	°С	-32	-32
Средняя температура наружного воздуха за отопительный период	°С	-5,4	-5,4
Продолжительность отопительного периода	сут	221	221
Количество дней с температурой от -32 до -18°С	сут	8	8
Количество дней с температурой от -18 до -0°С	сут	157	157
Количество дней с температурой от 0 до 8°С	сут	47	47
Количество дней с температурой от 8 до 16°С	сут	9	9
Градусо-сутки отопительного периода	°С·сут/год	5 834,4	5 834,4
<b>Основное оборудование</b>			
Элемент 1		Панель МФП	
Общая стоимость	руб	6 068 355,725	
Удельная стоимость (система, монтаж)	руб/м <sup>2</sup>	10 392,44	
Элемент 2			Вентилируемый фасад
Общая стоимость	руб		5 122 146,24

Наименование параметра	Единица измерения	Вариант 1, 2 (МФП, тепловой насос, СЭС)	Вариант 3 (Вентилируемый фасад)
Удельная стоимость (система, монтаж)	руб/м <sup>2</sup>		8 772
Элемент 3		Грунтовый коллектор (подача воздуха с улицы)	
Общая стоимость	руб	1 568 700	
Длина каналов	п.м	1 162	
Стоимость труб (ПНД 400 SDR 41 стенка 9,8 мм 750 руб/м.п)	руб	871 500	
Производительность (при кратности воздухообмена 1)	м <sup>3</sup> /час	3 403	
Объем котлована	м <sup>3</sup>	3 486	
Стоимость земляных работ (экскаватор, 150 руб/м <sup>3</sup> выемка, 50 руб/м <sup>3</sup> засыпка)	руб	697 200	
Число параллельных каналов	шт	18	
Средняя скорость воздушного потока в каналах	м/с	0,46	
Расчетная тепловая мощность коллектора (тепловой напор 18°С, нагрев до 0°С)	кВт	23,50	
Элемент 4		Вентиляторная установка ВР280-46, АИР 100 L4, фильтр	Вентиляторная установка ВР80-75 80А2, АИР 100 L4, фильтр
Общая стоимость	руб	86 000	86 000
Удельная стоимость	руб/шт	43 000	43 000
Количество	шт	2	2
Производительность	м <sup>3</sup> /час	3 810	3 750
Напор статический	Па	1 480	1 250

Наименование параметра	Единица измерения	Вариант 1, 2 (МФП, тепловой насос, СЭС)	Вариант 3 (Вентилируемый фасад)
Удельная потребляемая мощность	кВт	4	1,5
Общая потребляемая мощность	кВт	8	3
Стоимость фильтра	руб	1 000	1 000
Элемент 5		Нагреватель электрический ЕА 40-20/12	
Общая стоимость	руб	21 500	
Удельная стоимость	руб/шт	21 500	
Количество	шт	1	
Удельная мощность	кВт	12	
Общая потребляемая мощность	кВт	12	
Элемент 6		Тепловой насос Thermex Energy Pro 28	
Общая стоимость	руб	751 020	
Удельная стоимость	руб/шт	751 020	
Количество	шт	1	
Удельная тепловая мощность	кВт/шт	27,6	
Общая тепловая мощность	кВт	27,6	
Удельная потребляемая мощность (в пределах 2,5 -3,7 кВт)	кВт/шт	6	
Общая потребляемая мощность	кВт	6	
Элемент 7		Геотермальные зонды для	

Наименование параметра	Единица измерения	Вариант 1, 2 (МФП, тепловой насос, СЭС)	Вариант 3 (Вентилируемый фасад)
		теплового насоса (подвод тепла в систему)	
Общая стоимость	руб	786 400	
Расчетная тепловая мощность	кВт	28	
Суммарная длина каналов скважин (35 Вт/п.м)	м	800	
Количество скважин (глубина 60 м)	шт	14	
Стоимость земляных работ (бурение скважин, установка оборудования, 950 руб/п.м)	руб	760 000	
Стоимость труб контура (труба ПНД диаметр 15 мм 12 руб/п.м)	руб	26 400	
Элемент 8		Нагреватель WH 70-40/2 (передача тепла от теплового насоса воздуху)	Нагреватель WH 70-40/2 (передача тепла от теплового насоса воздуху)
Общая стоимость	руб	20 000	20 000
Количество	шт	1	1
Удельная стоимость	руб/шт	20 000	20 000
Элемент 9		Насос циркуляционный Grundfos ALPHA1 L 25-40	
Общая стоимость	руб	10 300	
Удельная стоимость	руб/шт	10 300	
Количество	шт	1	
Удельная потребляемая мощность	кВт	0,025	
Общая потребляемая мощность	кВт	0,025	

Наименование параметра	Единица измерения	Вариант 1, 2 (МФП, тепловой насос, СЭС)	Вариант 3 (Вентилируемый фасад)
Максимальный расход	м <sup>3</sup> /час	2,8	
Требуемый расход	м <sup>3</sup> /час	1,2	
Расчетная общая потребляемая мощность	кВт	0,006	
Элемент 10		Шумоглушитель NKD 60-30 (приточная и вытяжная часть)	Шумоглушитель NKD 60-30 (приточная и вытяжная часть)
Общая стоимость	руб	27 000	27 000
Стоимость	руб/шт	13 500	13 500
Количество	шт	2	2
Элемент 11		Теплый пол	
Общая стоимость (система)	руб	353 850	
Удельная стоимость (греющий кабель)	руб/п.м	76	
Общая стоимость (греющий кабель)	руб	319 200	
Удельная стоимость (термостат настенный)	руб/шт	990	
Количество (термостат настенный)	шт	35	
Общая стоимость (термостат настенный)	руб	34 650	
Длина кабеля на м <sup>2</sup>	п.м	5	
Удельная потребляемая мощность	кВт/п.м	0,015	
Суммарная максимальная потребляемая мощность	кВт	63	
Элемент 12		Конвектор электрический Ballu Enzo (отопление)	

Наименование параметра	Единица измерения	Вариант 1, 2 (МФП, тепловой насос, СЭС подвала и тамбура)	Вариант 3 (Вентилируемый фасад)
Общая стоимость	руб	10 000	
Удельная стоимость	руб/шт	2 500	
Количество	шт	4	
Удельная потребляемая мощность	кВт/шт	1	
Суммарная потребляемая мощность	кВт	4	
Элемент 13		Осушитель Dantherm CDP 165	
Общая стоимость	руб	1 504 087	
Удельная стоимость	руб/шт	1 504 087	
Количество	шт	1	
Удельная мощность	кВт/шт	4,3	
Общая потребляемая мощность	кВт	4,3	
Производительность	м <sup>3</sup> /час	3 600	
Общая производительность	м <sup>3</sup> /час	3 600	
Элемент 14			Система отопления
Общая стоимость радиаторов	руб		1 632 840
Удельная стоимость радиатора с комплектом подключения, вентилями, термоголовкой	руб/шт		24 740
Количество	шт		66
Удельная стоимость трубопроводов с изоляцией	руб/п.м		476

Наименование параметра	Единица измерения	Вариант 1, 2 (МФП, тепловой насос, СЭС)	Вариант 3 (Вентилируемый фасад)
Количество	пм		860
Общая стоимость трубопроводов	руб		409 360
Общая стоимость арматуры	руб		180 000
Общая стоимость распределительных узлов	руб		245 000
Элемент 15			Индивидуальный тепловой пункт
Общая стоимость	руб		540 670
Контроллер ECL210	руб		29 900
Электронный ключ A231	руб		11 300
Клеммная панель	руб		4 200
Датчик температуры наружный ESMT	руб		4 300
Воздушник JiP-WW/Dy15/Py40/Tmax180 сталь с/с	руб		12 000
Шаровой кран JiP Standard WW/Dy40/Py16/Tmax150 сталь с/с	руб		10 880
Манометр TM510. 0..16бар. 100мм. G1/2. кл. точн. 1.5. IP43	руб		4 200
Кран под манометр трехходовой. резьбовой G1/2/Py25/Tmax150	руб		4 250
Грязевик DN40 PN16 Ст20 RAL 7016 сталь ф/ф	руб		12 700
Спускник JiP-WW/Dy25/Py40/Tmax180 сталь с/с	руб		26 600
Фильтр ФСФ Dy40/Py16/Tmax200 чугун ф/	руб		2 980
Термометр биметаллический кл.точн.1.5. IP43	руб		2 000

Наименование параметра	Единица измерения	Вариант 1, 2 (МФП, тепловой насос, СЭС)	Вариант 3 (Вентилируемый фасад)
Регулятор перепада давлений DPR/Dу20/Kvs6.3/Tmax150 бронза р/р	руб		77 000
Регулирующий клапан VFM2/Dу15/Kvs4/Tmax150 чугун ф/ф	руб		39 000
Электропривод ARV152 082G6007	руб		42 000
Манометр TM510. 0..10бар. 100мм. G1/2. кл. точн. 1.5. IP43	руб		4 400
Термометр биметаллический. Ø80мм. 0..120С. кл. точн.1.5. IP43	руб		1 000
Теплообменник НН-06М-16/1-22-L	руб		27 000
Датчик температуры ESMU	руб		18 600
Шаровой кран BVR/Dу40/Ру40/Tmax110 латунь р/р	руб		16 200
Обратный клапан NRV EF/Dу40/Ру18/Tmax110 латунь р/р	руб		4 600
Вибровставка Ду40/Ру10/16/Tmax95 ф/ф	руб		29 800
Насос UPS 25-120	руб		55 800
Реле разности давлений RT262A	руб		31 000
Шаровой кран IVR Ду15/Ру25/Tmax130 латунь р/р	руб		600
Демпферная трубка	руб		6 960
Шаровой кран BVR/Dу25/Ру40/Tmax110 латунь р/р	руб		900
Обратный клапан NRV EF/Dу25/Ру25/Tmax110 латунь р/р	руб		1 200

Наименование параметра	Единица измерения	Вариант 1, 2 (МФП, тепловой насос, СЭС)	Вариант 3 (Вентилируемый фасад)
Насос UPS 25-60 180	руб		20 000
Соленоидный клапан EV220B/Dy25/Kvs11/Tmax90 латунь p/p	руб		12 300
Прессостат KPI35	руб		10 400
Шаровой кран BVR/Dy15/Py40/Tmax110 латунь p/p	руб		600
Предохранительный клапан Прегран КПП 095C/15x15 латунь p/p	руб		11 000
Расширительный бак Flexcon R 200	руб		5 000
Суммарная потребляемая мощность	кВт·ч		0,47
Элемент 16			Рекуператор REN 70-40
Общая стоимость	руб		47 000
Удельная стоимость	руб/шт		47 000
Удельная производительность	м <sup>3</sup> /час		3 800
Количество	шт		1
Общая производительность	м <sup>3</sup> /час		3 800
КПД	%		46
Прочие расходы			
Стоимость подключения к централизованным тепловым сетям	руб		2 000 000
Геометрические характеристики здания			
Высота этажа	м	3	3

Наименование параметра	Единица измерения	Вариант 1, 2 (МФП, тепловой насос, СЭС)	Вариант 3 (Вентилируемый фасад)
Количество этажей	эт	3	3
Длина здания	м	25,16	25,16
Ширина здания	м	19,16	19,16
Периметр здания (по наружной пов-ти стен)	м	88,64	88,64
Высота типового окна	м	2,7	2,7
Ширина типового окна	м	1,2	1,2
Площадь типового окна	м <sup>2</sup>	3,24	3,24
Количество окон на этаже	шт	22	22
Площадь окон в здании	м <sup>2</sup>	213,84	213,84
Площадь фасада (включая окна)	м <sup>2</sup>	797,76	797,76
Площадь фасада (не включая окна)	м <sup>2</sup>	583,92	583,92
Коэффициент остекленности фасада здания		0,268	0,268
Длина южного фасада	м	19,16	19,16
Площадь южного фасада (включая окна)	м <sup>2</sup>	172,44	172,44
Количество окон на одном этаже южного фасада	шт	6	6
Площадь южного фасада (не включая окна)	м <sup>2</sup>	114,12	114,12
Площадь, отведенная под ФЭП	м <sup>2</sup>	97,2	-
Площадь этажа по внутр.обмеру наружных стен	м <sup>2</sup>	448,96	448,96
Площадь этажа по наружн.обмеру наружных стен	м <sup>2</sup>	482,06	482,06

Наименование параметра	Единица измерения	Вариант 1, 2 (МФП, тепловой насос, СЭС)	Вариант 3 (Вентилируемый фасад)
Толщина кровельного пирога	м	0,25	0,25
Строительный объем надземной части	м <sup>3</sup>	4 459,055	4 459,055
Высота подвала	м	2,4	2,4
Строительный объем подземной части	м <sup>3</sup>	1 156,944	1 156,944
Строительный объем общий	м <sup>3</sup>	5 615,999	5 615,999
Площадь перекрытия над подвалом	м <sup>2</sup>	448,96	448,96
Площадь кровли	м <sup>2</sup>	448,96	448,96
Сумма площадей всех нар.пов.здания (по внутр.обмеру)	м <sup>2</sup>	1 941,516	1 941,516
Коэффициент компактности здания	м <sup>-1</sup>	0,389	0,389
Отапливаемый объем надземной части	м <sup>3</sup>	3 905,952	3 905,952
Отапливаемый объем подземной части	м <sup>3</sup>	1 077,504	1 077,504
Площадь квартир на 1 этаже	м <sup>2</sup>	355,9	355,9
Площадь квартир на типовом этаже	м <sup>2</sup>	373,9	373,9
Общая площадь квартир в здании	м <sup>2</sup>	1 103,7	1 103,7
Площадь теплого пола	м <sup>2</sup>	840	840
Площадь цоколя	м <sup>2</sup>	88,64	88,64
Площадь стен в грунте и пола по грунту	м <sup>2</sup>	606,156	606,156
Расчетное количество жителей в здании	чел	29	29
Площадь окон на южном фасаде здания	м <sup>2</sup>	58,32	58,32

Наименование параметра	Единица измерения	Вариант 1, 2 (МФП, тепловой насос, СЭС)	Вариант 3 (Вентилируемый фасад)
Площадь окон на северном фасаде здания	м <sup>2</sup>	38,88	38,88
Площадь окон на западном фасаде здания	м <sup>2</sup>	58,32	58,32
Площадь окон на восточном фасаде здания	м <sup>2</sup>	58,32	58,32
Объем лестничной клетки	м <sup>3</sup>	384	384
Вентилируемый объем здания	м <sup>3</sup>	3 403	3 403
<b>Теплотехнические показатели</b>			
Приведенное сопротивление теплопередаче наружных стен	м <sup>2</sup> ·°C/Вт	6,91	2,87
Приведенное сопротивление теплопередаче окон	м <sup>2</sup> ·°C/Вт	0,8	0,8
Приведенное сопротивление теплопередаче кровли	м <sup>2</sup> ·°C/Вт	4,23	4,23
Приведенное сопротивление теплопередаче перекрытия над подвалом	м <sup>2</sup> ·°C/Вт	2,71	2,71
Приведенное сопротивление теплопередаче пола по грунту и стен в грунте	м <sup>2</sup> ·°C/Вт	7,54	7,54
Приведенное сопротивление теплопередаче цоколя	м <sup>2</sup> ·°C/Вт	2,79	2,79
<b>Стоимость материалов</b>			
Алюминиевый лист, толщина 1 мм	руб/м <sup>2</sup>	1100	
Кратность на 1 м <sup>2</sup> панели		2	
Теплоизоляция Базалит сэндвич, плотность не менее 110 кг/м <sup>3</sup>	руб/м <sup>3</sup>	6500	
Кратность на 1 м <sup>2</sup> панели		0,23	

Наименование параметра	Единица измерения	Вариант 1, 2 (МФП, тепловой насос, СЭС)	Вариант 3 (Вентилируемый фасад)
Аквапанель Кнауф, толщина 12,5 мм	руб/м <sup>2</sup>	600	
Кратность на 1 м <sup>2</sup> панели		2	
Термопрофиль, 80x40 мм	руб/м	120	
Кратность на 1 м <sup>2</sup> панели		3,33	
Швеллер, 100x50x3 мм, ст3	руб/п.м	259	
Кратность на 1 м <sup>2</sup> панели		2,61	
Листовая сталь	руб/кг	40	
Кратность на 1 м <sup>2</sup> панели		2	
Бонка крепежная	руб/шт	40	
Кратность на 1 м <sup>2</sup> панели		3,33	
Винт	руб/шт	50	
Кратность на 1 м <sup>2</sup> панели		3,33	
Саморез	руб/шт	2	
Кратность на 1 м <sup>2</sup> панели		25	
Кирпич	руб/м <sup>2</sup>		1 720
Раствор для устройства кирпичной кладки	руб/м <sup>2</sup>		137
Штукатурная смесь для кирпичных стен	руб/м <sup>2</sup>		180
Утеплитель минераловатный (исполнение Б)	руб/м <sup>2</sup>		475
Алюминиевые композитные фасадные панели на подсистеме	руб/м <sup>2</sup>		2 560

Наименование параметра	Единица измерения	Вариант 1, 2 (МФП, тепловой насос, СЭС)	Вариант 3 (Вентилируемый фасад)
Стоимость фасада			
Удельная себестоимость по материалам (система без ФЭП)	руб/м <sup>2</sup>	6 400,29	
Скидка при оптовой закупке	%	15	
Удельная себестоимость по материалам с учетом скидки (система без ФЭП)	руб/м <sup>2</sup>	5 440,25	
Процент прибыли	%	80,00	
Цена продукции с учетом издержек и прибыли	руб/м <sup>2</sup>	9 792,44	
Стоимость строительно-монтажных работ			
Монтаж МФП	руб/м <sup>2</sup>	600	
Монтаж кирпичной кладки в один кирпич	руб/м <sup>2</sup>		800
Штукатурные работы	руб/м <sup>2</sup>		500
Утепление фасада, установка подсистемы, фасадных кассет	руб/м <sup>2</sup>		2 400
Общая стоимость фасада			
Общая стоимость фасада (материалы, работа)	руб/м <sup>2</sup>	10 392,44	8 772
Выработка энергии фотоэлектрическими преобразователями с м <sup>2</sup> (ФЭП)			
Годовая суммарная солнечная радиация на вертикальную поверхность при безобл. небе	кВт·ч/м <sup>2</sup>	1 776,94	
Количество солнечных дней в году	сут	135	
Коэффициент, учитывающий количество солнечных дней в году		0,37	
Годовая суммарная солнечная радиация на	кВт·ч/м <sup>2</sup>		

Наименование параметра	Единица измерения	Вариант 1, 2 (МФП, тепловой насос, СЭС)	Вариант 3 (Вентилируемый фасад)
вертикальную поверхность с учетом облачности		657,47	
Величина годовой суммарной солнечной радиации, поступающей на фасад с ФЭП	кВт·ч	63 906,08	
КПД ФЭП	%	20	
Величина годовой суммарной энергии, выработанной ФЭП	кВт·ч	12 781,22	
Тип фотоэлектрического преобразователя (ФЭП)		100W 18V ETFE SS-M100W 1150x510 мм	
Удельная стоимость ФЭП	руб/шт	4 557,60	
Максимальное напряжение ФЭП	В	18,00	
Максимальный ток ФЭП	А	5,56	
Мощность ФЭП	кВт	0,10	
Количество ФЭП (9 групп по 18 солнечных батарей 324 Вольта)	шт	162,00	
Общая стоимость ФЭП	руб	738 331,20	
Общая максимальная мощность ФЭП	кВт	16,21	
Тип сетевого инвертора		Герметичный трехфазный инвертор Sofar 20000TL-G2 (2 MPPT)	
Стоимость инвертора	руб/шт	162 640,00	
Количество инверторов	шт	1,00	
Общая стоимость инверторов	руб	162 640,00	
Удельная стоимость провода РКГМ 4 мм <sup>2</sup>	руб/п.м	63,00	

Наименование параметра	Единица измерения	Вариант 1, 2 (МФП, тепловой насос, СЭС)	Вариант 3 (Вентилируемый фасад)
Длина	м	200,00	
Удельная стоимость провода РКГМ 16 мм <sup>2</sup>	руб/п.м	190,00	
Длина	м	75,00	
Общая стоимость проводов	руб	26 850,00	
Общая стоимость сетевой солнечной станции	руб	927 821,20	
<b>Тарифы</b>			
Электроэнергия (Дневная зона с 07:00 до 23:00)	руб/(кВт·ч)	3,41	3,41
Электроэнергия (Ночная зона с 23:00 до 07:00)	руб/(кВт·ч)	1,62	1,62
Электроэнергия (Расчетный тариф "24/7")	руб/(кВт·ч)	2,81	2,81
Электроэнергия (оптовый тариф)	руб/(кВт·ч)	1,05	
Тепловая энергия (одноставочный тариф)	руб/Гкал		1 970,00
<b>Курсы валют</b>			
доллар/рубль	руб	75,96	75,96

### Приложение Б. РАСЧЕТ ЗАТРАТ НА ОТОПЛЕНИЕ И ВЕНТИЛЯЦИЮ ВАРИАНТОВ 1,2

Наименование параметра	Единица измерения	Значение
Расход электрической энергии на отопление и вентиляцию при температурах окружающей среды от -32 до -18 °С		
Вентиляторная установка BP280-46, АИР 100 L4, фильтр	кВт	8
Нагреватель электрический EA 40-20/12	кВт	12
Тепловой насос Thermex Energy Pro 28	кВт	6
Насос циркуляционный Grundfos ALPHA1 L 25-40	кВт	0,025
Теплый пол	кВт	63
Конвектор электрический Ballu Enzo (отопление подвала и тамбура)	кВт	4
Осушитель Dantherm CDP 165	кВт	4,3
Суммарная мощность оборудования	кВт	97,325
Суммарная потребленная мощность за период	кВт	18 686,4
Стоимость электроэнергии, затраченной на отопление и вентиляцию за период	руб	52 571,07
Расход электрической энергии на отопление и вентиляцию при температурах окружающей среды от -18 до 0 °С		
Вентиляторная установка BP280-46, АИР 100 L4, фильтр	кВт	8
Тепловой насос Thermex Energy Pro 28	кВт	6
Насос циркуляционный		

Наименование параметра	Единица измерения	Значение
Grundfos ALPHA1 L 25-40	кВт	0,025
Конвектор электрический Ballu Enzo (отопление подвала и тамбура)	кВт	4
Осушитель Dantherm CDP 165	кВт	4,3
Суммарная мощность оборудования	кВт	22,325
Суммарная потребленная мощность за период	кВт	84 120,6
Стоимость электроэнергии, затраченной на отопление и вентиляцию за период	руб	236 659,288
Расход электрической энергии на отопление и вентиляцию при температурах окружающей среды от 0 до 8 °С		
Вентиляторная установка ВР280-46, АИР 100 L4, фильтр	кВт	8
Тепловой насос Thermex Energy Pro 28	кВт	5,4
Насос циркуляционный Grundfos ALPHA1 L 25-40	кВт	0,0225
Осушитель Dantherm CDP 165	кВт	4,3
Суммарная мощность оборудования	кВт	17,7225
Суммарная потребленная мощность за период	кВт	19 990,98
Стоимость электроэнергии, затраченной на отопление и вентиляцию за период	руб	56 241,2904
Расход электрической энергии на отопление и вентиляцию при температурах окружающей среды от 8 до 16 °С		
Вентиляторная установка ВР280-46, АИР 100 L4, фильтр	кВт	8

Наименование параметра	Единица измерения	Значение
Тепловой насос Thermex Energy Pro 28	кВт	4,2
Насос циркуляционный Grundfos ALPHA1 L 25-40	кВт	0,0175
Осушитель Dantherm CDP 165	кВт	4,3
Суммарная мощность оборудования	кВт	16,5175
Суммарная потребленная мощность за период	кВт	3 567,78
Стоимость электроэнергии, затраченной на отопление и вентиляцию за период	руб	10 037,354
Расход электрической энергии на отопление и вентиляцию за отопительный период		
Суммарная потребленная мощность за период	кВт	126 365,76
Коэффициент, учитывающий влияние окон на затраты электроэнергии		0,04067
Стоимость электроэнергии, затраченной на отопление и вентиляцию за период с учетом окон	руб	369 968,88

### Приложение В. РАСЧЕТ ЗАТРАТ НА ОТОПЛЕНИЕ И ВЕНТИЛЯЦИЮ ВАРИАНТА 3

Наименование параметра	Единица измерения	Значение
Расчет удельной теплотехнической характеристики здания		
Коэффициент $n_t$ (жилой дом)		1,00
Коэффициент $n_t$ (подвал)		0,39
Расчетная температура воздуха в подвале	°C	5,00
Характеристика наружной стены	Вт/°C	203,46
Характеристика окон	Вт/°C	267,30
Характеристика кровли	Вт/°C	106,14
Характеристика пола по грунту и стен в грунте	Вт/°C	31,67
Характеристика цоколя	Вт/°C	12,52
Удельная теплозащитная характеристика здания	Вт/(м <sup>3</sup> ·°C)	0,12
Общий коэффициент теплопередачи здания	Вт/(м <sup>2</sup> ·°C)	0,32
Удельная характеристика внутренних теплопоступлений здания		
Величина бытовых тепловыделений на 1 м <sup>2</sup> площади жилых помещений	Вт/м <sup>2</sup>	12,00
Удельная характеристика бытовых тепловыделений	Вт/(м <sup>3</sup> ·°C)	0,10
Удельная характеристика теплопоступлений в здание от солнечной радиации		
Коэффициент общего пропускания солнечной		

Наименование параметра	Единица измерения	Значение
энергии для окон		0,68
Коэффициент, учитывающий затенение светового проема переплетами		0,70
Суммарная солнечная радиации на вертикальную поверхность (Ю) (56° С.Ш.)	МДж/м <sup>2</sup>	3570,00
Январь (Ю)	МДж/м <sup>2</sup>	358,00
Февраль (Ю)	МДж/м <sup>2</sup>	529,00
Март (Ю)	МДж/м <sup>2</sup>	733,00
Апрель (Ю)	МДж/м <sup>2</sup>	661,00
Октябрь (Ю)	МДж/м <sup>2</sup>	593,00
Ноябрь (Ю)	МДж/м <sup>2</sup>	436,00
Декабрь (Ю)	МДж/м <sup>2</sup>	260,00
Суммарная солнечная радиации на вертикальную поверхность (С) (56° С.Ш.)	МДж/м <sup>2</sup>	750,00
Январь (С)	МДж/м <sup>2</sup>	57,00
Февраль (С)	МДж/м <sup>2</sup>	108,00
Март (С)	МДж/м <sup>2</sup>	183,00
Апрель (С)	МДж/м <sup>2</sup>	220,00
Октябрь (С)	МДж/м <sup>2</sup>	83,00
Ноябрь (С)	МДж/м <sup>2</sup>	59,00
Декабрь (С)	МДж/м <sup>2</sup>	40,00

Наименование параметра	Единица измерения	Значение
Суммарная солнечная радиации на вертикальную поверхность (З) (56° С.Ш.)	МДж/м <sup>2</sup>	1 684,00
Январь (З)	МДж/м <sup>2</sup>	100,00
Февраль (З)	МДж/м <sup>2</sup>	222,00
Март (З)	МДж/м <sup>2</sup>	410,00
Апрель (З)	МДж/м <sup>2</sup>	503,00
Октябрь (З)	МДж/м <sup>2</sup>	240,00
Ноябрь (З)	МДж/м <sup>2</sup>	128,00
Декабрь (З)	МДж/м <sup>2</sup>	81,00
Суммарная солнечная радиации на вертикальную поверхность (В) (56° С.Ш.)	МДж/м <sup>2</sup>	1 684,00
Январь (В)	МДж/м <sup>2</sup>	100,00
Февраль (В)	МДж/м <sup>2</sup>	222,00
Март (В)	МДж/м <sup>2</sup>	410,00
Апрель (В)	МДж/м <sup>2</sup>	503,00
Октябрь (В)	МДж/м <sup>2</sup>	240,00
Ноябрь (В)	МДж/м <sup>2</sup>	128,00
Декабрь (В)	МДж/м <sup>2</sup>	81,00
Суммарные теплопоступления через окна за отопительный период	МДж/год	206 481,26
Удельная характеристика теплопоступлений в здание от солнечной радиации	Вт/(м <sup>3</sup> ·°С)	0,08

Наименование параметра	Единица измерения	Значение
Удельная вентиляционная характеристика здания		
Удельная теплоемкость воздуха	кДж/(кг·°С)	1,00
Количество приточного воздуха в здание	м <sup>3</sup> /ч	3 403,00
Средняя плотность приточного воздуха за отопительный период	кг/м <sup>3</sup>	1,27
Число часов работы механической вентиляции в течении недели	ч	168,00
Коэффициент эффективности рекуператора		0,46
Количество инфильтрующегося воздуха в здание	кг/ч	1 069,20
Коэффициент снижения объема воздуха, учитывающий наличие внутренних огр. констр.		0,85
Число часов учета инфильтрации в течении недели	ч	168,00
Удельная вентиляционная характеристика здания	Вт/(м <sup>3</sup> ·°С)	0,24
Расчетная удельная характеристика расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания		
Коэффициент полезного использования теплоступлений		0,55
Коэффициент эффективности регулирования подачи теплоты в системах отопления		0,90
Средняя кратность воздухообмена здания за отопительный период	1/ч	1,28
Удельная характеристика расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию	Вт/(м <sup>3</sup> ·°С)	0,27
Расход тепловой энергии на отопление и вентиляцию, общие теплопотери здания		

Наименование параметра	Единица измерения	Значение
Удельный расход энергии на отопление и вентиляцию за отопительный период (к объему)	кВт·ч/(м <sup>3</sup> ·год)	37,50
Удельный расход энергии на отопление и вентиляцию за отопительный период (к площади)	кВт·ч/(м <sup>2</sup> ·год)	138,76
Расход тепловой энергии на отопление и вентиляцию за отопительный период	кВт·ч/год	186 887,03
Общие теплопотери здания за отопительный период	кВт·ч/год	257 006,32
Стоимость тепловой энергии на отопление и вентиляцию	руб	435 420,11
Расход электрической энергии на отопление и вентиляцию за отопительный период		
Оборудование ИТП	кВт	0,47
Вентиляторная установка ВР80-75 80А2, АИР 100 L4, фильтр	кВт	3,00
Суммарная мощность оборудования	кВт	3,47
Суммарная потребленная мощность за период	кВт	18 404,88
Стоимость электроэнергии, затраченной на отопление и вентиляцию за период	руб	51 779,06
Стоимость тепловой и электрической энергии за отопительный период		
Стоимость тепловой и электрической энергии за отопительный период	руб	487 199,18

### Приложение Г. ПОЛНАЯ СТОИМОСТЬ РЕАЛИЗАЦИИ ДЛЯ ТРЕХ ВАРИАНТОВ

Наименование параметра	Единица измерения	Значение
Полная стоимость реализации Вариант 1 (МФП без СЭС)		
Полная стоимость реализации	руб	11 207 212,73
Панели МФП	руб	6 068 355,73
Грунтовый коллектор (подача воздуха с улицы)	руб	1 568 700,00
Вентиляторная установка ВР280-46, АИР 100 L4, фильтр	руб	86 000,00
Нагреватель электрический EA 40-20/12	руб	21 500,00
Тепловой насос Thermex Energy Pro 28	руб	751 020,00
Геотермальные зонды для теплового насоса (подвод тепла в систему)	руб	786 400,00
Нагреватель WH 70-40/2 (передача тепла от теплового насоса воздуху)	руб	20 000,00
Насос циркуляционный Grundfos ALPHA1 L 25-40	руб	10 300,00
Шумоглушитель NKD 60-30 (приточная и вытяжная часть)	руб	27 000,00
Теплый пол	руб	353 850,00
Конвектор электрический Ballu Enzo (отопление подвала и тамбура)	руб	10 000,00
Осушитель Dantherm CDP 165	руб	1 504 087,00
Полная стоимость реализации Вариант 2 (МФП с СЭС)		

Наименование параметра	Единица измерения	Значение
Полная стоимость реализации	руб	12 135 033,93
Сетевая солнечная станция (СЭС)	руб	927 821,20
Полная стоимость реализации Вариант 3 (вентилируемый фасад)		
Полная стоимость реализации	руб	9 475 656,24
Вентилируемый фасад	руб	5 122 146,24
Вентиляторная установка ВР80-75 80А2, АИР 100 L4, фильтр	руб	86 000,00
Нагреватель WH 70-40/2 (передача тепла от теплового насоса воздуху)	руб	20 000,00
Шумоглушитель NKD 60-30 (приточная и вытяжная часть)	руб	27 000,00
Система отопления	руб	1 632 840,00
Индивидуальный тепловой пункт	руб	540 670,00
Рекуператор REN 70-40	руб	47 000,00
Стоимость подключения к централизованным тепловым сетям	руб	2 000 000,00

**Приложение Д. РАСЧЕТ NPV СРАВНЕНИЕ А (Вариант 1 с вариантом 3)**

Номер периода	Год	Ставка дисконтирования	Разность ежегодных затрат на потребляемую энергию, руб	Дисконтированный чистый денежный поток, руб	NPV, руб
1	2020	0,04	117 230,30	122 114,89	-1 609 441,59
2	2021	0,04	117 230,30	127 203,01	-1 482 238,58
3	2022	0,04	117 230,30	132 503,14	-1 349 735,44
4	2023	0,04	117 230,30	138 024,10	-1 211 711,34
5	2024	0,04	117 230,30	143 775,11	-1 067 936,23
6	2025	0,04	117 230,30	149 765,74	-918 170,49
7	2026	0,04	117 230,30	156 005,98	-762 164,52
8	2027	0,04	117 230,30	162 506,23	-599 658,29
9	2028	0,04	117 230,30	169 277,32	-430 380,97
10	2029	0,04	117 230,30	176 330,54	-254 050,43
11	2030	0,04	117 230,30	183 677,65	-70 372,79
12	2031	0,04	117 230,30	191 330,88	120 958,09
13	2032	0,04	117 230,30	199 303,00	320 261,09
14	2033	0,04	117 230,30	207 607,29	527 868,38
15	2034	0,04	117 230,30	216 257,60	744 125,98
16	2035	0,04	117 230,30	225 268,33	969 394,31
17	2036	0,04	117 230,30	234 654,51	1 204 048,82

Номер периода	Год	Ставка дисконтирования	Разность ежегодных затрат на потребляемую энергию, руб	Дисконтированный чистый денежный поток, руб	NPV, руб
18	2037	0,04	117 230,30	244 431,78	1 448 480,60
19	2038	0,04	117 230,30	254 616,44	1 703 097,04
20	2039	0,04	117 230,30	265 225,46	1 968 322,49
21	2040	0,04	117 230,30	276 276,52	2 244 599,01
22	2041	0,04	117 230,30	287 788,04	2 532 387,05
23	2042	0,04	117 230,30	299 779,21	2 832 166,26
24	2043	0,04	117 230,30	312 270,01	3 144 436,26
25	2044	0,04	117 230,30	325 281,26	3 469 717,52

**Приложение Е. РАСЧЕТ NPV СРАВНЕНИЕ Б (Вариант 2 с продажей выработанной энергии по оптовому тарифу с вариантом 3)**

Номер периода	Год	Ставка дисконтирования	Разность ежегодных затрат на потребляемую энергию, руб	Дисконтированный чистый денежный поток, руб	NPV, руб
1	2020	0,04	130 650,58	136 094,35	-2 523 283,33
2	2021	0,04	130 650,58	141 764,95	-2 381 518,38
3	2022	0,04	130 650,58	147 671,82	-2 233 846,56
4	2023	0,04	130 650,58	153 824,82	-2 080 021,74
5	2024	0,04	130 650,58	160 234,18	-1 919 787,56
6	2025	0,04	130 650,58	166 910,61	-1 752 876,95
7	2026	0,04	130 650,58	173 865,22	-1 579 011,74
8	2027	0,04	130 650,58	181 109,60	-1 397 902,14
9	2028	0,04	130 650,58	188 655,83	-1 209 246,30
10	2029	0,04	130 650,58	196 516,49	-1 012 729,81
11	2030	0,04	130 650,58	204 704,68	-808 025,13
12	2031	0,04	130 650,58	213 234,04	-594 791,09
13	2032	0,04	130 650,58	222 118,79	-372 672,29
14	2033	0,04	130 650,58	231 373,74	-141 298,55
15	2034	0,04	130 650,58	241 014,32	99 715,77
16	2035	0,04	130 650,58	251 056,58	350 772,35

Номер периода	Год	Ставка дисконтирования	Разность ежегодных затрат на потребляемую энергию, руб	Дисконтированный чистый денежный поток, руб	NPV, руб
17	2036	0,04	130 650,58	261 517,27	612 289,62
18	2037	0,04	130 650,58	272 413,82	884 703,44
19	2038	0,04	130 650,58	283 764,40	1 168 467,84
20	2039	0,04	130 650,58	295 587,92	1 464 055,76
21	2040	0,04	130 650,58	307 904,08	1 771 959,84
22	2041	0,04	130 650,58	320 733,42	2 092 693,25
23	2042	0,04	130 650,58	334 097,31	2 426 790,56
24	2043	0,04	130 650,58	348 018,03	2 774 808,59
25	2044	0,04	130 650,58	362 518,78	3 137 327,37

**Приложение Ж. РАСЧЕТ NPV СРАВНЕНИЕ В (Вариант 2 с продажей выработанной энергии по двухставочному тарифу с вариантом 3)**

Номер периода	Год	Ставка дисконтирования	Разность ежегодных затрат на потребляемую энергию, руб	Дисконтированный чистый денежный поток, руб	NPV, руб
1	2020	0,04	153 188,13	159 570,97	-2 499 806,72
2	2021	0,04	153 188,13	166 219,76	-2 333 586,96
3	2022	0,04	153 188,13	173 145,58	-2 160 441,38
4	2023	0,04	153 188,13	180 359,98	-1 980 081,40
5	2024	0,04	153 188,13	187 874,98	-1 792 206,41
6	2025	0,04	153 188,13	195 703,10	-1 596 503,31
7	2026	0,04	153 188,13	203 857,40	-1 392 645,91
8	2027	0,04	153 188,13	212 351,46	-1 180 294,45
9	2028	0,04	153 188,13	221 199,44	-959 095,01
10	2029	0,04	153 188,13	230 416,08	-728 678,93
11	2030	0,04	153 188,13	240 016,75	-488 662,19
12	2031	0,04	153 188,13	250 017,45	-238 644,74
13	2032	0,04	153 188,13	260 434,84	21 790,10
14	2033	0,04	153 188,13	271 286,29	293 076,40
15	2034	0,04	153 188,13	282 589,89	575 666,28
16	2035	0,04	153 188,13	294 364,47	870 030,75

Номер периода	Год	Ставка дисконтирования	Разность ежегодных затрат на потребляемую энергию, руб	Дисконтированный чистый денежный поток, руб	NPV, руб
17	2036	0,04	153 188,13	306 629,65	1 176 660,40
18	2037	0,04	153 188,13	319 405,89	1 496 066,29
19	2038	0,04	153 188,13	332 714,47	1 828 780,76
20	2039	0,04	153 188,13	346 577,57	2 175 358,33
21	2040	0,04	153 188,13	361 018,30	2 536 376,63
22	2041	0,04	153 188,13	376 060,73	2 912 437,36
23	2042	0,04	153 188,13	391 729,93	3 304 167,29
24	2043	0,04	153 188,13	408 052,01	3 712 219,30
25	2044	0,04	153 188,13	425 054,18	4 137 273,48